

明 細 書

電動パワーステアリング装置

技術分野

[0001] 本発明は、自動車などの車両に搭載され、電動モータを用いてドライバーの操舵動作を補助する電動パワーステアリング装置に関する。

背景技術

[0002] 例えば自動車に搭載される電動パワーステアリング装置は、操舵部材から操向車輪に至る操舵機構に連結された電動モータを備えており、このモータ動力を操舵機構に付与することで上記操舵部材でのドライバーによる操舵動作を補助するようになっている。

ところで、上記電動モータでは、そのロータ磁石の極数やステータ巻線用のスロット数等のモータ構成に起因して生じるコギングトルク(機械的リップル)と、誘導起電力波形が理想波形に対し歪むことによって発生する電気リップルとに大別されるリップル(脈動)が出力トルクに生じる。このようなモータ出力でのトルクリップルは、上記ステアリング装置における操舵フィーリングを低下させる要因の一つであり、ゆえに当該ステアリング装置ではトルクリップルを抑制することが強く望まれている。

そこで、従来装置には、例えば特開2003-61272号公報に記載されているように、上記スロットのロータ磁石に対向する部分の形状を変更したり、スキュー角度を調整したりすることにより、トルクリップルを低減しようとしたものがある。

[0003] ところで、電動パワーステアリング装置では、上記電動モータとして例えば3相ブラシレスモータが用いられている。

ところが、上記のようなモータでは、歪みをもつ磁界の回転により生じる電流の高次成分に起因して、その出力トルクにトルクリップル(電気リップル)が現れて、操舵フィーリングの低下を生じることがあった。

[0004] 本発明は、上記のような従来の問題点に鑑み、電流高次成分に起因するトルクリップルを抑えることができ、よって操舵フィーリングの低下を抑制することができる電動パワーステアリング装置を提供することを目的とする。

発明の開示

[0005] 上記目的を達成するための本発明は、操舵部材の操作に応じて電動モータの目標電流値を決定し、そのモータ動力を操舵機構に付与して操舵補助を行う電動パワーステアリング装置であって、

前記電動モータの回転位置情報と決定された前記目標電流値とを用いて、当該モータを流れる電流の所定の高次成分に起因するトルクリップルを打ち消すための電流高次成分用の補償値を決定するトルクリップル補償決定手段と、前記トルクリップル補償決定手段からの補償値を用いて、前記決定された目標電流値を補正する補正手段と、前記補正手段によって補正された後の目標電流値に基づき、前記電動モータをフィードバック制御するフィードバック制御手段とを備えたことを特徴とするものである。

[0006] 上記のように構成された電動パワーステアリング装置では、トルクリップル補償決定手段が、電動モータの回転位置情報と、操舵部材の操作に応じて決定された目標電流値とを用いることにより、その目標電流値の電流が当該モータに供給されたときに、その電流の所定の高次成分によって発生するトルクリップルを予期し、この予期したトルクリップルを打ち消すための電流高次成分用の補償値を決定している。また、上記フィードバック制御手段は、補正手段がトルクリップル補償決定手段からの補償値を基に補正した目標電流値に基づき電動モータをフィードバック制御するので、当該制御手段が補正後の目標電流値の電流を供給させたときに上記所定の電流高次成分が取り除かれた状態で当該モータへの電流供給が行われて、電流高次成分に起因するトルクリップルを抑えることができる。

[0007] また、上記電動パワーステアリング装置において、前記トルクリップル補償決定手段は、前記決定された目標電流値に応じて、前記電流高次成分用の補償値を変化させることが好ましい。

この場合、上記の補償値がモータ負荷に応じて変化されることとなり、モータ負荷が変化したときでも、フィードバック制御手段はより適切な補償値にて補正された目標電流値を用いて電動モータを制御することができ、操舵フィーリング低下をより確実に防ぐことができる。

[0008] また、上記電動パワーステアリング装置において、前記トルクリップル補償決定手段には、前記電流高次成分用の補償値を決定する電流高次歪み補償部に加えて、前記電動モータの回転位置情報と決定された前記目標電流値とを用いて、当該モータ内に形成される磁界の歪みに起因するトルクリップルを抑制するための磁界歪み用の補償値を決定する磁界歪み補償部が設けられてもよい。

この場合、上記電流高次歪み補償部が決定する電流高次成分用の補償値に加えて、磁界歪み補償部が決定する磁界歪み用の補償値を用いて、目標電流値が補正されることとなり、上記フィードバック制御手段が当該目標電流値の電流を流させたときに電流高次成分に起因するトルクリップルだけでなく電動モータ内に形成される磁界歪みに起因するトルクリップルを抑制することができ、これらリップルによる操舵フィーリング低下を防ぐことができる。

[0009] また、上記電動パワーステアリング装置において、前記電動モータ及び前記フィードバック制御手段を含んだ電流制御系と、前記回転位置情報を基に前記電動モータの回転速度を検出する回転速度検出手段と、前記回転速度検出手段からの前記電動モータの回転速度に基づいて、前記電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下を補償するためのゲイン補償値を求めるゲイン補償演算手段とを備え、

前記補正手段は、前記トルクリップル補償決定手段からの補償値と、前記ゲイン補償演算手段からのゲイン補償値とを用いて、前記決定された目標電流値を補正することが好ましい。

この場合、上記フィードバック制御手段がトルクリップル補償決定手段からの補償値とゲイン補償演算手段からのゲイン補償値とを用いて補正された目標電流値に基づいて、電動モータをフィードバック制御することとなり、上記電流制御系の周波数特性に従って、そのモータを流れる電流のゲインがモータ回転速度の増加に応じて低下するのを補償することができ、当該ゲイン低下に伴って操舵フィーリングが低下するのを抑制することができる。

[0010] また、上記電動パワーステアリング装置において、前記回転速度検出手段からの前記電動モータの回転速度に基づいて、前記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れを補償するための位相補償値を求める位相補償演算手段を備え、

前記補正手段は、前記トルクリプル補償決定手段からの補償値と、前記ゲイン補償演算手段からのゲイン補償値と、前記位相補償演算手段からの位相補償値とを用いて、前記決定された目標電流値を補正してもよい。

この場合、上記フィードバック制御手段がトルクリプル補償決定手段からの補償値とゲイン補償演算手段からのゲイン補償値と位相補償演算手段からの位相補償値とを用いて補正された目標電流値に基づいて、電動モータをフィードバック制御することとなり、上記電流制御系の周波数特性に従って、そのモータを流れる電流が誘起電圧に対してモータ回転速度の増加に応じて位相遅れを生じるのを補償することができ、当該位相遅れに伴う操舵フィーリング低下を抑制することができる。

図面の簡単な説明

- [0011] [図1]本発明の一実施形態に係る電動パワーステアリング装置の主要部の構成を示す模式図である。
- [図2]図1に示した電動モータでの3相交流座標とd-q座標との関係を示す図である。
- [図3]図1に示したECUの構成例を示すブロック図である。
- [図4]図3に示した磁界歪み補償部の具体的な構成例を示すブロック図である。
- [図5]図3に示した電流高次歪み補償部の具体的な構成例を示すブロック図である。
- [図6]図3に示した電流制御系の周波数特性の具体例を示すボード線図である。
- [図7]上記電動モータの無負荷誘導起電力(誘起電圧)の実測データ的具体例を示す波形図である。
- [図8]上記磁界歪み補償部にて決定される磁界歪み補償電流成分の具体的な波形を示す波形図である。
- [図9]上記電動モータでの誘起電圧に含まれる高次成分について、その1次成分に対する割合の測定例を示すグラフである。
- [図10]上記電動モータの目標電流値について、電流高次成分の1次成分に対するゲイン変化の測定例を示すグラフである。
- [図11]上記電動モータの具体的な出力トルクを示す波形図である。

発明を実施するための最良の形態

- [0012] 以下、本発明の電動パワーステアリング装置の好ましい実施形態について、図面を

参照しながら説明する。尚、以下の説明では、操舵部材に連なる操舵軸に電動モータとしてのブラシレスモータを連結したコラムアシスト式の電動パワーステアリング装置に適用した場合を例示して説明する。

[0013] [電動パワーステアリング装置の全体構成]

図1は、本発明の一実施形態に係る電動パワーステアリング装置の主要部の構成を示す模式図である。図において、当該装置は、例えば自動車に搭載され、操舵部材(ステアリングホイール)1に加わるドライバーの操舵動作に応じて、操向車輪8の向きを変える操舵軸2を備えている。すなわち、操舵軸2の一端側には、操舵部材1が連結されるとともに、他端側には左右の上記操向車輪8がラックピニオン式伝達機構6及びタイロッド7等を介して連結されている。そして、操舵軸2の回転が、ラックピニオン式伝達機構6によって左右方向の直線運動に変換され、操向車輪8が転舵される。

また、上記操舵軸2の途中には、トルクセンサ3と、減速機構4を介在させて連結された電動モータ5とが設けられている。これらの減速機構4と電動モータ5とが、操舵部材1から操向車輪8に至る操舵機構にモータ動力による操舵補助力を付与する操舵補助部を構成している。つまり、上記トルクセンサ3は、ドライバーの操舵部材1へのステアリング操作や操向車輪8側から逆入力される路面抵抗などに応じて操舵軸2に生じたトルクを検出して、そのトルク検出値を示すトルク検出信号Tsを制御装置としてのECU 10に出力する。また、このECU 10には、イグニションスイッチ12のオン/オフ操作に応じてバッテリー11から電力供給が行われるとともに、自動車速度を検出する車速センサ9からの車速信号Vsと、上記モータ5のロータ回転に応じた信号とが入力されるようになっており、ECU 10はこれらの入力信号を基に電動モータ5の駆動制御を行うことで所望の操舵補助力による操舵補助を実施するようになっている。

[0014] [電動モータの構成及びその駆動制御の概要]

上記電動モータ5は、図2を参照して、例えば永久磁石を有するロータと、U相、V相、及びW相の各相コイル(ステータ巻線)とを備え、正弦波駆動方式の3相スター結線のブラシレスモータにより構成されている。

ここで、このモータ5において、所望の操舵補助力を発生させるために、各相コイル

に供給すべき相電流の目標値、つまり各相コイルに対する電流指令値 i^*_u 、 i^*_v 、及び i^*_w は、その供給電流の最大値(振幅)を I^* としたときに次の(1)～(3)式で表される。

$$i^*_u = I^* \times \sin \theta_{re} \quad \text{---(1)}$$

$$i^*_v = I^* \times \sin(\theta_{re} - 2\pi/3) \quad \text{---(2)}$$

$$i^*_w = I^* \times \sin(\theta_{re} - 4\pi/3) = -i^*_u - i^*_v \quad \text{---(3)}$$

但し、 θ_{re} は、同図に示すように、例えばU相コイルを基準として時計方向まわりに正回転する永久磁石(ロータ)の回転角度(電気角)である。この電気角は、ロータの回転位置を示す情報であり、当該ロータの実際の回転角度を示す機械角を θ_m とし、ロータの磁極数を p としたときに、 $\theta_{re} = (p/2) \times \theta_m$ で表される。尚、以下の説明においては、特に明記するとき以外は、角度は電気角を表すものとする。

[0015] また、電動モータ5は、上記ECU 10に含まれた後述のフィードバック制御部によってフィードバック制御されており、さらにこのフィードバック制御ではd-q座標が用いられている。具体的には、上記d-q座標は、永久磁石による磁束の方向をd軸とし、このd軸に直交する方向をq軸と規定したものであり、上記磁石回転(回転界磁)と同期して回転する回転座標系である。そして、ECU 10は、電動モータ5への印加電圧の指令値を決定する際に、まず上記(1)～(3)式に示した各相コイルでの電流指令値 i^*_u 、 i^*_v 、及び i^*_w を、次の(4)及び(5)にそれぞれ表されるd軸電流指令値 i^*_d 及びq軸電流指令値 i^*_q に変換し、これらの変換したd-q座標の電流指令値 i^*_d 及び i^*_q に基づき上記印加電圧指令値を決めている。このように、3相交流座標(静止座標)での電流指令値 i^*_u 、 i^*_v 、及び i^*_w をd-q座標の電流指令値 i^*_d 及び i^*_q に変換することにより、モータ5の回転時でもECU 10はその供給電流を直流量で制御可能となって、位相遅れの低減等を行いつつ、当該モータ5の駆動制御を高精度に実施して所望の操舵補助力を容易に発生させることができる。

$$i^*_d = 0 \quad \text{---(4)}$$

$$i^*_q = -\sqrt{3/2} \times I^* \quad \text{---(5)}$$

[0016] また、電動モータ5のU相、V相、及びW相の各相コイルを実際に流れる電流については、後述の電流検出器にて例えばU相電流検出値 i_u 及びV相電流検出値 i_v が

検出されて、それらの検出値 i_u 及び i_v を下記の(6)及び(7)式に代入することでd-q座標に変換した後のd軸電流検出値 i_d 及びq軸電流検出値 i_q が求められるようになっている。そして、ECU 10では、後に詳述するように、上記d軸電流指令値 i^*_d 及びq軸電流指令値 i^*_q とd軸電流検出値 i_d 及びq軸電流検出値 i_q とを用いたフィードバック制御が行われる。

$$i_d = \sqrt{2} \{ i_v \times \sin \theta_{re} - i_u \times \sin (\theta_{re} - 2\pi/3) \} \quad \text{---(6)}$$

$$i_q = \sqrt{2} \{ i_v \times \cos \theta_{re} - i_u \times \cos (\theta_{re} - 2\pi/3) \} \quad \text{---(7)}$$

[0017] [ECUの構成及び動作]

図3は、図1に示したECUの構成例を示すブロック図である。図に示すように、上記ECU 10には、上記トルクセンサ3からのトルク信号 T_s を入力する位相補償器13と、マイクロコンピュータ(以下、“マイコン”と略称する。)100と、このマイコン100からの指示に従って上記電動モータ5をPWM信号にて駆動するハードウェアにより構成されたモータ駆動部とが設けられている。このモータ駆動部には、マイコン100に接続された3相PWM変調部31と、この3相PWM変調部31と駆動対象の電動モータ5の各ステータ巻線(U、V、W相の各コイル)との間に接続されたモータ駆動回路32とが設けられている。

また、上記モータ駆動部は、モータ駆動回路32と上記3相コイルのうち、例えばV相コイル及びU相コイルに供給される電流をそれぞれ検出するV相電流検出器33及びU相電流検出器34と、電動モータ5側に設けられ、レゾルバなどにより構成された位置検出センサ51からのセンサ出力(ロータ回転に応じた信号 S_r)を基に上記電気角を検出するロータ角度位置検出器35とを備えており、図に点線にて囲んで示すように、当該モータ駆動部とマイコン100の一部分とで電動モータ5をフィードバック制御する上記フィードバック制御部200を構成している。また、上記位置検出センサ51とロータ角度位置検出器35とが、電動モータ5の回転位置情報(電気角)を取得する回転位置情報取得手段を構成している。

[0018] 上記マイコン100には、その内部に設けられた不揮発性のメモリ(図示せず)に予め格納されているプログラムを実行することにより、モータ制御に必要な所定の演算処理を行う複数の機能ブロックが設けられている。すなわち、このマイコン100には、図

3に示すように、目標電流値演算部14、回転方向指定部15、収斂性補正部16、加算器17、磁界歪み補償部18、電流高次歪み補償部19、ロータ角速度演算部20、加算器21、22、減算器23、24、d軸電流PI制御部25、q軸電流PI制御部26、d-q／3相交流座標変換部27、符号反転加算器28、3相交流／d-q座標変換部29、及び正弦波ROMテーブル30が含まれており、車速センサ9からの車速信号Vs等の入力信号を基に所望の操舵補助力を決定し、この決定した操舵補助力に対応した出力(指示)信号を上記モータ駆動部に与えるモータ制御部を構成している。

また、このモータ制御部では、上記磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19を有するトルクリップル補償決定部101が設けられており、この補償決定部101の演算結果をモータ駆動部への指示信号に反映させることにより、後に詳述するように、電動モータ5内に形成される磁界の歪みに起因するトルクリップルと当該モータ5を流れる電流の高次成分に起因するトルクリップルとを低減できるようになっている。さらに、ロータ角速度演算部20が、上述の回転位置情報取得手段からの回転位置情報を基に電動モータ5の回転速度を検出する回転速度検出手段を構成している。

[0019] 上記のように構成されたECU 10では、トルクセンサ3から上記トルク検出信号Tsを入力すると、上記位相補償器13がそのトルク検出信号Tsに位相補償を施してマイコン100の目標電流値演算部14に出力する。また、このECU 10は、上記車速センサ9から所定のサンプリング周期で出力される車速信号Vsを入力しており、その入力した車速信号Vsは、マイコン100の目標電流値演算部14及び収斂性補正部16に与えられている。さらに、ECU 10では、位置検出センサ51からセンサ信号Srがロータ角度位置検出器35に入力されると、このロータ角度位置検出器35は入力したセンサ信号Srに基づいて電動モータ5の永久磁石(ロータ)の回転位置、つまり上記電気角 θ_{re} を検出する。そして、ロータ角度位置検出器35は、検出した電気角 θ_{re} を示す角度信号をマイコン100の磁界歪み補償部18、電流高次歪み補償部19、ロータ角速度演算部20、及び正弦波ROMテーブル30に出力する。

[0020] 上記目標電流値演算部14は、位相補償後のトルク検出信号Tsと車速信号Vsとに基づいて、電動モータ5に供給すべき供給電流の値である目標電流値Itを求める。詳細には、この演算部14には、アシストマップと呼ばれる、操舵軸2でのトルク、このト

ルクに応じて所望の操舵補助力を発生させるための上記目標電流値 I_t 、及び車速の関係を示したテーブルが予め格納されている。そして、当該演算部14は上記トルク検出信号 T_s 及び車速信号 V_s の各値を入力パラメータとして、上記テーブルを参照することにより、目標電流値 I_t を取得し、回転方向指定部15及び加算器17に出力する。

また、この目標電流値 I_t は、上述の(5)式にて示されたq軸電流指令値 i^*_q に相当するものであり、モータ動力によるアシスト方向を示す符号を有している。つまり、目標電流値 I_t の符号は、モータロータの回転方向を指定しており、例えば正及び負の場合にそれぞれ操舵部材1での右方向操舵及び左方向操舵を補助するように電動モータ5を回転させることを示している。

[0021] 上記回転方向指定部15は、目標電流値演算部14から入力した目標電流値 I_t の符号に基づきロータ回転方向を判別し、その回転方向を指定する方向信号 S_{dir} を生成して収斂性補正部16に出力する。この収斂性補正部16には、上記車速信号 V_s と、方向信号 S_{dir} と、上記ロータ角速度演算部20がロータ角速度位置検出器35から入力した電気角 θ_{re} を基に算出したロータ角速度 ω_{re} とが入力されており、当該補正部16はこれらの入力信号を用いた所定演算を行うことにより、車両収斂性を確保するための補償電流値 i_c を求める。そして、この補償電流値 i_c は、加算器17にて上記目標電流値 I_t に加算され、加算器17は、その加算結果をq軸基本電流指令値 i^*_{q0} として出力する。

上記q軸基本電流指令値 i^*_{q0} は、所望の操舵補助力を発生するためのモータ負荷（つまり、電動モータ5が発生すべきトルク）に対応する供給電流の基本的な指令値（目標電流値）であり、トルクリプル補償決定部101の磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19に同時に与えられるとともに、加算器22にも出力されて上記磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19での演算結果が反映されるよう加算される。

一方、d軸方向の電流はトルクに関与しないことから、そのd軸電流の基本的な指令値であるd軸基本電流指令値 i^*_{d0} の値は“0”であり、 $i^*_{d0}=0$ として加算器21に設定入力されている。

[0022] 上記磁界歪み補償部18は、ロータ角度位置検出器35からの電動モータ5の回転位置情報としての電気角 θ_{re} と、加算器17からのq軸基本電流指令値 i^*_q0 とを用いて、そのモータ5内に形成される磁界の歪みに起因するトルクリップルを抑制するための磁界歪み用の補償値を決定している。つまり、磁界歪み補償部18は、上記q軸基本電流指令値 i^*_q0 にて指令される電流が電動モータ5の各相コイルに供給されたときに、各相コイルに誘起する誘導起電力波形での理想波形に対する歪み(モータ5内の磁界の歪み)に起因してモータ出力トルクに現れるトルクリップルを予期して、予期したトルクリップルが抑制されるように当該q軸基本電流指令値 i^*_q0 を変更するための電流の補償値をd軸電流及びq軸電流毎に算出しd軸電流補償値 $\Delta id1$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq1$ として決定している(詳細は後述)。そして、磁界歪み補償部18は、対応する加算器21及び22に定めた磁界歪み用のd軸電流補償値 $\Delta id1$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq1$ を出力する。

また、この磁界歪み補償部18から出力されるd軸電流補償値 $\Delta id1$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq1$ は、後に詳述するように、電動モータ5を含んだ後述の電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下及び位相遅れが極力生じないように補正されている。

[0023] また、上記電流高次歪み補償部19は、上述の電気角 θ_{re} 及びq軸基本電流指令値 i^*_q0 を用いて、そのモータ5を流れる電流の所定の高次成分に起因するトルクリップルを打ち消すための電流高次成分用の補償値を決定している。つまり、電流高次歪み補償部19は、上記q軸基本電流指令値 i^*_q0 にて指令される電流が電動モータ5の各相コイルに供給されたときに、各相コイルを流れる電流の所定の高次成分によって発生するトルクリップルを予期して、予期したトルクリップルが打ち消されるように当該q軸基本電流指令値 i^*_q0 を変更するための電流の補償値をd軸電流及びq軸電流毎に算出しd軸電流補償値 $\Delta id2$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq2$ として決定している(詳細は後述)。そして、電流高次歪み補償部19は、対応する加算器21及び22に定めた電流高次成分用のd軸電流補償値 $\Delta id2$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq2$ を出力する。

また、電流高次歪み補償部19から出力されるd軸電流補償値 $\Delta id2$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq2$ は、後に詳述するように、電動モータ5を含んだ上述の電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下及び位相遅れが極力生じないように補正されている

。

[0024] 上記加算器21及び22は、対応するd軸電流及びq軸電流毎に、トルクリプル補償決定部101からの補償値を基に操舵部材1の操作に応じて決定された目標電流値を補正する補正手段を構成している。

具体的には、上記加算器21では、下記の(8)式に示すように、当該加算器21に設定されたd軸基本電流指令値 i^*_{d0} と、磁界歪み補償部18からの磁界歪み用のd軸電流補償値 $\Delta id1$ と、電流高次歪み補償部19からの電流高次成分用のd軸電流補償値 $\Delta id2$ との和を求めることにより、トルクリプル補償決定部101の演算結果を反映した後のd軸電流指令値 i^*_d が算出されている。そして、加算器21は、算出したd軸電流指令値 i^*_d をフィードバック制御部200の減算器23に出力する。

また、加算器22では、下記の(9)式に示すように、上記加算器17からのq軸基本電流指令値 i^*_{q0} と、磁界歪み補償部18からの磁界歪み用のq軸電流補償値 $\Delta iq1$ と、電流高次歪み補償部19からの電流高次成分用のq軸電流補償値 $\Delta iq2$ との和を求めることにより、トルクリプル補償決定部101の演算結果を反映した後のq軸電流指令値 i^*_q が算出されている。そして、加算器22は、算出したq軸電流指令値 i^*_q をフィードバック制御部200の減算器24に出力する。

$$i^*_d = i^*_{d0} + \Delta id1 + \Delta id2 \quad \text{—(8)}$$

$$i^*_q = i^*_{q0} + \Delta iq1 + \Delta iq2 \quad \text{—(9)}$$

[0025] 上記減算器23には、加算器21からのd軸電流指令値 i^*_d に加えて、電動モータ5に実際に供給されている電流のd軸電流に換算した後のd軸電流検出値 id が3相交流／d-q座標変換部29から入力されている。同様に、上記減算器24には、加算器22からのq軸電流指令値 i^*_q に加えて、電動モータ5に実際に供給されている電流のq軸電流に換算した後のq軸電流検出値 iq が3相交流／d-q座標変換部29から入力されている。

詳細に言えば、3相交流／d-q座標変換部29には、上記V相電流検出器33及びU相電流検出器34によってそれぞれ検出されたV相電流検出値 i_v 及びU相電流検出値 i_u が入力されている。さらに、この変換部29には、上記検出電流が流されているときでの上記電気角 θ_{re} のsin値が正弦波ROMテーブル30から入力されている。こ

の正弦波ROMテーブル30は、角度 θ とその角度 θ のsin値とを互いに関連付けて記憶しており、上記ロータ角度位置検出器35から電気角 θ_{re} を入力したときにそのsin値を上記d-q/3相交流座標変換部27及び3相交流/d-q座標変換部29に直ちに出力するようになっている。

そして、この3相交流/d-q座標変換部29は、入力したU相電流検出値 i_u 、V相電流検出値 i_v 、及びsin値と、上述の(6)及び(7)式とを用いて、上記d軸電流検出値 i_d ($=\sqrt{2}\{i_v \times \sin \theta_{re} - i_u \times \sin(\theta_{re} - 2\pi/3)\}$) 及びq軸電流検出値 i_q ($=\sqrt{2}\{i_v \times \cos \theta_{re} - i_u \times \cos(\theta_{re} - 2\pi/3)\}$) を算出して対応する減算器23、24に出力する。

[0026] また、上記減算器23は、入力したd軸電流指令値 i^*_d とd軸電流検出値 i_d とを減算することにより、これらの入力値の偏差であるd軸電流偏差 $e_d (=i^*_d - i_d)$ を求めている。同様に、減算器24は、入力したq軸電流指令値 i^*_q とq軸電流検出値 i_q とを減算することにより、これらの入力値の偏差であるq軸電流偏差 $e_q (=i^*_q - i_q)$ を求めている。そして、これらの減算器23、24は、求めたd軸電流偏差 e_d 及びq軸電流偏差 e_q をd軸電流PI制御部25及びq軸電流PI制御部26にそれぞれ出力する。

上記d軸電流PI制御部25及びq軸電流PI制御部26は、次の(10)及び(11)式に、対応する減算器23、24からのd軸電流偏差 e_d 及びq軸電流偏差 e_q をそれぞれ代入することにより、d軸電圧指令値 v^*_d 及びq軸電圧指令値 v^*_q を算出し、それら算出値をd-q/3相交流座標変換部27に出力する。

$$v^*_d = K_p\{e_d + (1/T_i) \int (e_d) dt\} \quad \text{---(10)}$$

$$v^*_q = K_p\{e_q + (1/T_i) \int (e_q) dt\} \quad \text{---(11)}$$

但し、上記 K_p 及び T_i は、それぞれ比例ゲイン及び積分時間であり、モータ特性などに応じてd軸電流PI制御部25及びq軸電流PI制御部26に予め設定された値である。

[0027] 上記d-q/3相交流座標変換部27には、d軸電流PI制御部25からのd軸電圧指令値 v^*_d 、q軸電流PI制御部26からのq軸電圧指令値 v^*_q 、及び正弦波ROMテーブル30からのsin値が入力されている。そして、この変換部27は、次に示す(12)及び(13)式を用いて、d-q座標上の印加電圧指令値である上記d軸電圧指令値 v^*_d 及びq軸電圧指令値 v^*_q を、3相交流座標上の同指令値であるU相電圧指令値 v^*_u

とV相電圧指令値 v^*v とに変換して、上記3相PWM変調部31に出力する。また、この変換部27の出力値は符号反転加算器28に入力されるようになっており、この符号反転加算器28は下記の(14)式を用いて、上記のU相電圧指令値 v^*u 及びV相電圧指令値 v^*v からW相電圧指令値 v^*w を求めて、3相PWM変調部31に出力する。

$$v^*u = \sqrt{(2/3)} \{v^*d \times \cos \theta_{re} - v^*q \times \sin \theta_{re}\} \quad \text{---(12)}$$

$$v^*v = \sqrt{(2/3)} \{v^*d \times \cos(\theta_{re} - 2\pi/3) - v^*q \times \sin(\theta_{re} - 2\pi/3)\} \\ \text{---(13)}$$

$$v^*w = -v^*u - v^*v \quad \text{---(14)}$$

[0028] 上記3相PWM変調部31は、上記のU相電圧指令値 v^*u 、V相電圧指令値 v^*v 、及びW相電圧指令値 v^*w にそれぞれ対応したデューティ比のPWM信号 S_u 、 S_v 、及び S_w を生成して、モータ駆動回路32に出力する。

上記モータ駆動回路32は、MOSFETなどの電力用スイッチング素子を用いたブリッジ回路を有するPWM電圧形インバータを含んだものであり、各スイッチング素子を上記PWM信号 S_u 、 S_v 、及び S_w に従ってオン／オフ動作させることにより、電動モータ5のU相、V相、及びW相の各相コイル(図2)にバッテリー11(図1)からの電圧が印加される。これにより、電動モータ5では、その各相コイルに電流が流れて、当該モータ5はその電流に応じたトルク T_m を生じ操舵補助力として上記操舵機構に付与する。また、このように電動モータ5が駆動されると、フィードバック制御部200では、上記d軸電流検出値 i_d 及びq軸電流検出値 i_q がそれぞれd軸電流指令値 i^*d 及びq軸電流指令値 i^*q に等しくなるように当該モータ5をフィードバック制御することで所望の操舵補助力にて操舵補助が行われる。

[0029] [電流制御系の構成及びその周波数特性]

また、本実施形態では、図3において、上記フィードバック制御部200と、その制御対象の電動モータ5、及び位置検出センサ51とにより、フィードバックループを有する上記電流制御系が構成されている。この電流制御系では、上記モータ5内に設置されたコイルのインピーダンスなどに規定される周波数特性を有している。また、電流制御系では、d軸電流指令値 i^*d 及びd軸電流検出値 i_d をそれぞれ入力及び出力とするd軸電流のフィードバックループと、q軸電流指令値 i^*q 及びq軸電流検出値 i_q を

それぞれ入力及び出力とするq軸電流のフィードバックループとのいずれの閉ループの場合も、その伝達関数に対するボード線図は、例えば図6にて示されるものとなる。すなわち、この電流制御系では、実用的な周波数範囲において、周波数が増大するにつれて、図6の実線に示すように、ゲインが1 (dB=0) から低下する。また、位相遅れは、同図に点線にて示すように、周波数が増大するにつれて、大きくなる。このような電流制御系の周波数特性の影響を抑えるために、上記トルクリプル補償決定部101では、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各部において、図6に実線及び点線にて示したデータがテーブル化されて、後述の周波数特性マップとして保持されており、各部の出力補償値は、当該周波数特性に依存するゲイン低下及び位相遅れが極力生じないように補正されている。

[0030] [磁界歪み補償部の構成及びその動作]

図4は、図3に示した磁界歪み補償部の具体的な構成例を示すブロック図である。図に示すように、上記磁界歪み補償部18には、周波数算出部36、ゲイン・位相決定部37、減算器38、磁界歪み補償値決定部39、振幅決定部40、修正率算出部41、及び乗算器42、43の機能ブロックが設定されており、マイコン100がプログラムを実行することにより、上記ブロックは各々所定の演算処理を行うようになっている。また、上記周波数算出部36、ゲイン・位相決定部37、及び修正率算出部41が、電動モータ5 (図3) の回転速度に基づいて、上記電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下を補償するためのゲイン補償値を求めるゲイン補償演算手段を構成している。また、周波数算出部36とゲイン・位相決定部37とは、同モータ5の回転速度に基づいて、上記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れを補償するための位相補償値を求める位相補償演算手段を兼用している。

[0031] 具体的にいえば、上記周波数算出部36は、ロータ角速度演算部20から電動モータ5の電気角換算の回転角速度である上記ロータ角速度 ω_{re} を入力している。そして、この周波数算出部36は、入力したロータ角速度 ω_{re} を次の(15)式に代入することにより、モータ出力に現れる磁界歪みに起因するトルクリプルの周波数 f を算出する。また、この周波数 f は、電流高次成分歪みに起因するトルクリプルの基本周波数である。

$$f = S \times \omega_{re} / (2\pi) \quad \text{---(15)}$$

但し、Sは、トルクリップルの次数(電気角一周期あたりに発生するトルクリップルの数)である。

[0032] 上記ゲイン・位相決定部37には、上記ボード線図(図6)に示した上記電流制御系の周波数特性に対応した周波数特性マップ37a(すなわち、図6に実線及び点線にて示した周波数とゲイン及び位相との関係を示すデータ)が保持されている。そして、このゲイン・位相決定部37は、周波数算出部36から上記周波数fを入力したときに、周波数特性マップ37aを参照して、入力した周波数fに応じた電流制御系のゲインG及び位相差 $\Delta \theta_e$ を求めて、修正率算出部41及び減算器38にそれぞれ出力する。また、上述のように、電流制御系では、周波数が増大するにつれて(つまり、ロータ角速度 ω_{re} 、ひいては電動モータ5の回転速度が速くなるにつれて)、ゲインが1から低下し位相遅れが大きくなる。

[0033] 上記減算器38は、上記ロータ角度位置検出器35(図3)から電気角 θ_{re} を入力するとともに、ゲイン・位相決定部37からの位相補償値としての位相差 $\Delta \theta_e$ を入力しており、電気角 θ_{re} から位相差 $\Delta \theta_e$ を減算処理している。そして、減算器38は、その減算処理結果である修正電気角 $\theta_{mre} (= \theta_{re} - \Delta \theta_e)$ を磁界歪み補償値決定部39に出力する。このように、減算器38が、位相差 $\Delta \theta_e$ を用いて、検出された電気角 θ_{re} を修正することにより、上記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れを補償することができる。

[0034] 上記磁界歪み補償値決定部39には、上記電気角と、d軸電流及びq軸電流毎の磁界歪み補償電流成分の値との関係をテーブル化した磁界歪み補償マップ39aが格納されており、この磁界歪み補償マップ39aを参照することで、当該補償値決定部39は入力した修正電気角 θ_{mre} に対応する磁界歪み用のd軸電流単位補償値 Δi_{d10} 及びq軸電流単位補償値 Δi_{q10} を決定している。

[0035] 以下、上記磁界歪み補償マップ39aの作成方法について、具体的に説明する。

電動モータ5を無負荷運転したときに当該モータ5内に形成される磁界の歪み、つまり無負荷誘導起電力波形がその理想波形に歪みを生じている場合に、各相コイルに正弦波電流である電流 i_u 、 i_v 、 i_w を供給すると、そのモータ出力には磁界歪みに起

因するトルクリップルが生じる。ここで、無負荷誘導起電力の各相コイルでの瞬時値 e_{0u} 、 e_{0v} 、 e_{0w} が既知であれば、モータ5の出力トルクを一定値(例えば1[Nm])とし上記磁界歪みに起因するトルクリップルを生じさせないような各相コイルの電流 i_{0u} 、 i_{0v} 、 i_{0w} を決定することができる。例えば、上記出力トルクを一定値 T としたときに、そのような各相コイルの電流 i_{0u} 、 i_{0v} 、 i_{0w} は、次の(16)、(17)、及び(18)式にてそれぞれ算出することができる。

$$i_{0u} = \{ (e_{0u} - e_{0v}) + (e_{0u} - e_{0w}) \} \times T \\ \div \{ (e_{0u} - e_{0v})^2 + (e_{0u} - e_{0w})^2 + (e_{0w} - e_{0v})^2 \} - (16)$$

$$i_{0v} = \{ T - (e_{0u} - e_{0w}) \times i_u \} \div (e_{0v} - e_{0w}) - (17)$$

$$i_{0w} = \{ T - (e_{0u} - e_{0v}) \times i_u \} \div (e_{0w} - e_{0v}) - (18)$$

また、(16)～(18)式で算出される各相コイルの電流 i_{0u} 、 i_{0v} 、 i_{0w} を、電気角 θ を変数とする次の(19)及び(20)式によってd-q座標上の値に変換することにより、上記磁界歪みに起因するトルクリップルを生じさせずに出力トルクを一定値 T とするようなd軸電流値 i_{0d} 及びq軸電流値 i_{0q} を算出することができる。

$$i_{0d} = \sqrt{2} \{ i_{0v} \times \sin \theta - i_{0u} \times \sin (\theta - 2\pi / 3) \} - (19)$$

$$i_{0q} = \sqrt{2} \{ i_{0v} \times \cos \theta - i_{0u} \times \cos (\theta - 2\pi / 3) \} - (20)$$

[0036] 上記のように、d軸電流値 i_{0d} 及びq軸電流値 i_{0q} を算出することができるので、磁界歪み補償マップ39aを次のようにして作成することができる。

まず、図7に示すように、電動モータ5の各相コイルでの無負荷誘導起電力(誘起電圧)について、そのモータ5の電気角の値が変化したときでの瞬時値 e_{0u} 、 e_{0v} 、 e_{0w} の各実測データを取得しておく。そして、これらの各実測データを用いて、モータ5が上記磁界歪みに起因するトルクリップルを生じさせることなく単位トルク(1[Nm])を出力するのに必要なd軸電流値 i_{0d1} 及びq軸電流値 i_{0q1} を上述の(16)～(20)式により求める。さらに、無負荷誘導起電力波形が歪んでいない場合に当該モータ5が上記単位トルクを出力するのに必要なd軸電流値 i_{0d2} 及びq軸電流値 i_{0q2} を求める(尚、この場合では、出力トルクはq軸電流に比例し、d軸電流は“0”とすればよいので、これらd軸電流値 i_{0d2} 及びq軸電流値 i_{0q2} は上述の各実測データに所定演算を行うことにより容易に求めることができる。)。そして、電気角の値毎に、上記d軸電流値 i

0d1とd軸電流値i0d2との差を求めて上述のd軸電流単位補償値 $\Delta id10 (=i0d1-i0d2)$ とし、かつ上記q軸電流値i0q1とq軸電流値i0q2との差を求めて上述のq軸電流単位補償値 $\Delta iq10 (=i0q1-i0q2)$ として、これらの電気角とd軸電流単位補償値 $\Delta id10$ 及びq軸電流単位補償値 $\Delta iq10$ とを対応付ければよい。この結果、例えば図8に示すように、電気角と、この電気角に応じたd軸電流及びq軸電流に変換した後の磁界歪みを抑制可能な電流成分である上記磁界歪み補償電流成分の値とを示す電流波形を得ることができ、これらのデータを対応付けたテーブルを磁界歪み補償マップ39aとして作成することができる。

[0037] 上記磁界歪み補償値決定部39は、上述のように作成された磁界歪み補償マップ39aを参照することにより、減算器38から入力した修正電気角 θ_{mre} に対応するd軸電流単位補償値 $\Delta id10$ 及びq軸電流単位補償値 $\Delta iq10$ を決定し、振幅決定部40に出力する。

上記振幅決定部40には、磁界歪み補償値決定部39からのd軸電流単位補償値 $\Delta id10$ 及びq軸電流単位補償値 $\Delta iq10$ に加えて、加算器17(図3)からの所望の操舵補助力に相当するq軸基本電流指令値 i^*_{q0} が入力されている。そして、振幅決定部40は、入力したq軸基本電流指令値 i^*_{q0} を基に単位トルク当たりのd軸電流単位補償値 $\Delta id10$ 及びq軸電流単位補償値 $\Delta iq10$ に対する乗算値を決定し、それらの乗算処理を行うことにより、上記所望の操舵補助力に応じたd軸電流補償値 $\Delta id11$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq11$ を求めている。振幅決定部40は、求めたd軸電流補償値 $\Delta id11$ 及びq軸電流補償値 $\Delta iq11$ を乗算器42及び43にそれぞれ出力する。

[0038] また、上記修正率算出部41には、ゲイン・位相決定部37が決定した上記電流制御系のゲインGが入力されており、この修正率算出部41は当該ゲインGの逆数 $1/G$ を算出し上述のゲイン補償値としての修正率 R_m を求める。そして、修正率算出部41は、修正率 R_m を乗算器42及び43に出力する。

上記乗算器42は、振幅決定部40からのd軸電流補償値 $\Delta id11$ に修正率算出部41からの修正率 R_m を乗じることにより、上記磁界歪み補償用のd軸電流補償値 $\Delta id1$ を求めて加算器21(図3)に出力する。同様に、乗算器43は、振幅決定部40からのq軸電流補償値 $\Delta iq11$ に修正率算出部41からの修正率 R_m を乗じることにより、上記

磁界歪み補償用のq軸電流補償値 Δi_{q1} を求めて加算器22(図3)に出力する。このように、乗算器42及び43が、修正率 R_m を用いて、d軸電流補償値 Δi_{d11} 及びq軸電流補償値 Δi_{q11} を修正することにより、上記電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下を補償することができる。

[0039] [電流高次歪み補償部の構成及びその動作]

図5は、図3に示した電流高次歪み補償部の具体的な構成例を示すブロック図である。図に示すように、電流高次歪み補償部19には、周波数算出部36、ゲイン・位相決定部37、減算器38、修正率算出部41、電流高次歪み補償値決定部44、及び乗算器45、46の機能ブロックが設定されており、マイコン100がプログラムを実行することにより、上記ブロックは各々所定の演算処理を行うようになっている。また、これらの機能ブロックのうち、周波数算出部36、ゲイン・位相決定部37、減算器38、及び修正率算出部41は、上記磁界歪み補償部18のものと同一演算処理を実施するよう構成されており、上記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れ及びゲイン低下を補償するための位相補償値 $\Delta \theta_e$ 及びゲイン補償値 R_m を算出するようになっている。

[0040] 上記電流高次歪み補償値決定部44は、上記q軸基本電流指令値 i^*_{q0} と、所定の高次成分として例えば5次、7次、11次、及び13次成分の各1次成分に対するゲインとの関係をテーブル化した電流高次歪みマップ44a、及び上記所定の高次成分とこれらの各高次成分における1次成分に対する位相ずれを補償するための修正値との関係をテーブル化した位相修正マップ44bを保持している。そして、この電流高次歪み補償値決定部44は、減算器38から上記修正電気角 θ_{mre} 及び加算器17(図3)からq軸基本電流指令値 i^*_{q0} を入力したときに、電流高次歪みマップ44a及び位相修正マップ44bを参照することにより、電流高次歪み用のd軸電流基本補償値 Δi_{d21} 及びq軸電流基本補償値 Δi_{q21} を決定している。

[0041] ここで、電流高次歪み補償マップ44a及び位相修正マップ44bの作成方法について、具体的に説明する。

電動モータ5では、モータ駆動回路32(図3)がバッテリー(図1)からの直流をチョッパすることで正弦波状の交流を各相コイルに与えていたり、同駆動回路32内の上記ブ

リッジ回路を構成する各スイッチング素子での短絡を防ぐために微少なデッドタイムを設けて、これらのスイッチング素子を駆動しているなどの要因によって、各相コイルを流れる電流では正弦波(基本波)電流成分に第5、第7、第11、及び第13高調波等の高調波電流成分が重畳している。つまり、モータ5では、上述の要因により、その誘起電圧に例えば図9に示すような上記所定の高次成分が含まれており、各相コイルを流れる電流にも歪みをもつ磁界の回転による同じ高次成分電流が加わって基本波形(理想波形)に対して歪んだものとなる。それ故、各相コイルを流れる電流の実測データを予め取得するとともに、その取得した電流値に重畳する高次成分の各実測値を把握し、それらの各高次成分の実測値に基づいて上記加算器21、22での加算処理で各高次成分の電流が相殺されるようd-q座標に変換した後の高次成分毎の補償値を決定すればよい。すなわち、上記d軸電流基本補償値 $\Delta id21$ 及びq軸電流基本補償値 $\Delta iq21$ は、下記の(21)及び(22)式にてそれぞれ示すように、第5次成分の電流を打ち消すための補償値 $\Delta id2-5$ 、 $\Delta iq2-5$ と、第7次成分の電流を打ち消すための補償値 $\Delta id2-7$ 、 $\Delta iq2-7$ と、第11次成分の電流を打ち消すための補償値 $\Delta id2-11$ 、 $\Delta iq2-11$ と、第13次成分の電流を打ち消すための補償値 $\Delta id2-13$ 、 $\Delta iq2-13$ とに分けることができる。

$$\Delta id21 = \Delta id2-5 + \Delta id2-7 + \Delta id2-11 + \Delta id2-13 \quad \text{---(21)}$$

$$\Delta iq21 = \Delta iq2-5 + \Delta iq2-7 + \Delta iq2-11 + \Delta iq2-13 \quad \text{---(22)}$$

[0042] また、上記所定の電流高次成分の各重畳割合は、所望の操舵補助力であるモータ負荷(出力トルク)、つまり上記q軸基本電流指令値 i^*_{q0} に応じて変化するものであり、各高次成分の電流位相もまたq軸基本電流指令値 i^*_{q0} に応じて1次成分の電流位相に対しずれを生じる。さらに、第5次及び第7次の電流高次成分は、電動モータ5の出力トルクでは第6次のトルク高次成分として現れることから、上記第5次電流用の補償値 $\Delta id2-5$ 、 $\Delta iq2-5$ 及び第7次電流用の補償値 $\Delta id2-7$ 、 $\Delta iq2-7$ は、次の(23)〜(26)式でそれぞれ示される。

$$\Delta id2-5 = i_5(i^*_{q0}) \times \sin[6\{\theta_{re} + \theta_5(i^*_{q0})\}] \quad \text{---(23)}$$

$$\Delta iq2-5 = i_5(i^*_{q0}) \times \cos[6\{\theta_{re} + \theta_5(i^*_{q0})\}] \quad \text{---(24)}$$

$$\Delta id2-7 = i_7(i^*_{q0}) \times \sin[6\{\theta_{re} + \theta_7(i^*_{q0})\}] \quad \text{---(25)}$$

$$\Delta i_{q2-7} = -i_7(i^*_{q0}) \times \cos[6\{\theta_{re} + \theta_7(i^*_{q0})\}] - (26)$$

また、第11次及び第13次の電流高次成分は、電動モータ5の出力トルクでは第12次のトルク高次成分として現れることから、上記第11次電流用の補償値 Δi_{d2-11} 、 Δi_{q2-11} 及び第13次電流用の補償値 Δi_{d2-13} 、 Δi_{q2-13} は、次の(27)～(30)式で示される。

$$\Delta i_{d2-11} = i_{l1}(i^*_{q0}) \times \sin[12\{\theta_{re} + \theta_{11}(i^*_{q0})\}] - (27)$$

$$\Delta i_{q2-11} = i_{l1}(i^*_{q0}) \times \cos[12\{\theta_{re} + \theta_{11}(i^*_{q0})\}] - (28)$$

$$\Delta i_{d2-13} = i_{l3}(i^*_{q0}) \times \sin[12\{\theta_{re} + \theta_{13}(i^*_{q0})\}] - (29)$$

$$\Delta i_{q2-13} = -i_{l3}(i^*_{q0}) \times \cos[12\{\theta_{re} + \theta_{13}(i^*_{q0})\}] - (30)$$

[0043] 上記の(23)～(30)式を用いることにより、第5、第7、第11、及び第13次電流用の各補償値をd軸電流及びq軸電流毎に算出することができるので、電流高次歪み補償マップ44a及び位相修正マップ44bを次のようにして作成することができる。

まず、電動モータ5の出力トルクが変化するようにその供給電流を変化させた場合での各電流高次成分における1次成分(基本波)に対する電流高次成分ゲインについて、その実測データを取得する。これにより、例えば図10に示すように、各電流高次成分毎のq軸基本電流指令値 i^*_{q0} と電流高次ゲインとの関係を示すグラフを得ることができる。尚、この図において、各高次電流成分での4個のプロットは、電動モータ5での出力トルクを示しており、図の左から右側に向かって順に同出力トルクが1.0、2.0、3.0、及び4.0[Nm]の場合を示している。そして、作成したグラフに基づいて、例えば第5次電流成分の振幅に相当する上記(23)及び(24)式での $i_5(i^*_{q0})$ の値と、q軸基本電流指令値 i^*_{q0} の値とを対応付けたテーブルを電流高次歪み補償マップ44aとして作成することができる。

また、上記のように、出力トルク(モータ負荷)を変化させた場合でのモータ供給電流の測定波形に基づいて、その電流波形に含まれた基本波に対する各高次成分波の位相ずれの実測データを取得する。そして、その取得データを基に上記位相ずれを解消するための修正値、例えば第5次電流成分での修正値として上記(23)及び(24)式での $\theta_5(i^*_{q0})$ を決定することができる。そして、この決定した修正値と、q軸基本電流指令値 i^*_{q0} の値とを対応付けたテーブルを位相修正マップ44bとして作成す

ることができる。

[0044] そして、電流高次歪み補償値決定部44は、ゲイン・位相決定部37からの位相補償値 $\Delta \theta_e$ にて修正された修正電気角 θ_{mre} が減算器38から入力され、かつ加算器17(図3)からq軸基本電流指令値 i^*_q0 が入力されると、上述のように作成された電流高次歪み補償マップ44a及び位相修正マップ44bを参照することにより、入力した修正電気角 θ_{mre} 及びq軸基本電流指令値 i^*_q0 に対応するd軸電流基本補償値 Δi_{d21} 及びq軸電流基本補償値 Δi_{q21} を決定する。そして、電流高次歪み補償値決定部44は、d軸電流基本補償値 Δi_{d21} 及びq軸電流基本補償値 Δi_{q21} を乗算器45及び46にそれぞれ出力して、これらの乗算器45及び46にて修正率算出部41からのゲイン補償値 R_m が乗算されて、電流高次歪み用のd軸電流補償値 Δi_{d2} 及びq軸電流補償値 Δi_{q2} として対応する加算器21、22に出力される。

[0045] 以上のように構成された本実施形態では、電流高次歪み補償部(トルクリップル補償決定手段)19が上記修正電気角 θ_{mre} (回転位置情報)とq軸基本電流指令値 i^*_q0 (目標電流値)とを用いて、上記q軸基本電流指令値 i^*_q0 にて指令される電流が電動モータ5の各相コイルに供給されたときに、そのモータ5を流れる電流の第5、第7、第11、及び第13次成分によって発生するトルクリップルを予期して、予期したトルクリップルが打ち消されるように当該q軸基本電流指令値 i^*_q0 を変更するための電流高次歪み用のd軸電流補償値 Δi_{d2} 及びq軸電流補償値 Δi_{q2} を決定している。また、磁界歪み補償部(トルクリップル補償決定手段)18が上記修正電気角 θ_{mre} とq軸基本電流指令値 i^*_q0 とを用いて、上記q軸基本電流指令値 i^*_q0 にて指令される電流が電動モータ5の各相コイルに供給されたときに、当該モータ5内の磁界の歪みに起因してモータ出力トルクに現れるトルクリップルを予期して、予期したトルクリップルが抑制されるように当該q軸基本電流指令値 i^*_q0 を変更するための磁界歪み用のd軸電流補償値 Δi_{d1} 及びq軸電流補償値 Δi_{q1} を決定している。そして、加算器21及び22(補正手段)が、上述の(8)及び(9)式に示したように、決定されたd軸電流補償値 Δi_{d1} とd軸電流補償値 Δi_{d2} 及びq軸電流補償値 Δi_{q1} とq軸電流補償値 Δi_{q2} とを用いて、対応するd軸電流及びq軸電流の指令値を変更し、フィードバック制御部(フィードバック制御手段)200がこれら変更された指令値に基づき電動モータ5を駆動して

いる。この結果、上記目標電流値に基づく電流がモータ5に流されたときに、電流高次成分に起因するトルクリップル及び磁界歪みに起因するトルクリップルを抑制することができ、これらリップルによる操舵フィーリング低下を防ぐことができる。

[0046] また、本実施形態では、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各部において、周波数算出部36、ゲイン・位相決定部37、及び修正率算出部41からなるゲイン補償演算手段が設けられ、この演算手段が算出したゲイン補償値(修正率 R_m)により、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各出力値が補正されている。これにより、上記電流制御系の周波数特性に従って、そのモータを流れる電流のゲインがモータ回転速度の増加に応じて低下するのを補償することができ、当該ゲイン低下に伴って操舵フィーリングが低下するのを抑制することができる。

[0047] また、本実施形態では、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各部において、周波数算出部36及びゲイン・位相決定部37からなる位相補償演算手段が設けられ、この演算手段が算出した位相補償値(位相差 $\Delta \theta_e$)により、検出された電気角 θ_{re} が修正されて、上記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れが補償されている。これにより、電動モータ5の回転速度が変化したときでも、モータ5での供給電流が上記電流制御系の周波数特性に従って、誘起電圧に対する位相遅れが発生するのを補償することができ、当該位相遅れに伴う操舵フィーリング低下を抑制することができる。

[0048] ここで、電動モータの具体的な出力トルクを示す図11を参照して、上記トルクリップル補償決定手段の効果について具体的に説明する。

フィードバック制御部200が、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各出力値を用いずに上述の(8)及び(9)式での各第1項で示したd軸基本電流指令値 i^*_d0 及びq軸基本電流指令値 i^*_q0 を用いて電動モータ5を駆動したときには、図11の一点鎖線にて示すように、そのモータ出力トルクには大きいトルクリップルが現れて大幅に変動した。

また、フィードバック制御部200が、磁界歪み補償部18の出力値を用いたとき、つまり上記(8)及び(9)式での各第1及び第2項の和で指定される目標電流値を用いて電動モータ5を駆動したときには、そのモータ出力トルクのうち磁界歪みに起因す

るリップル分が排除されて、当該トルクの検出波形は同図の点線に示されるものとなった。

[0049] さらに、フィードバック制御部200が、磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19の各出力値を用いたとき、つまり上記(8)及び(9)式での各第1～第3項の和で指定される目標電流値を用いて電動モータ5を駆動したときには、上記磁界歪みに起因するリップル分に加え、上記第5、第7、第11、及び第13次電流成分に起因するリップル分も取り除かれる。詳細には、モータ出力トルクから上記(23)～(26)式にて求められる第6次のリップル分及び上記(27)～(30)式にて求められる第12次のリップル分が排除されて、当該トルクの検出波形は同図の実線に示すように、変動が極めて少ない安定したものとなった。すなわち、本実施形態では、図10に示したように、q軸基本電流指令値 i^*_q0 (所望の操舵補助力を発生するためのモータ負荷)が大きくなるにつれて、その電動モータ5を流れる電流に電流高次成分が重畳し易く、その重畳した電流高次成分に起因するトルクリップル分も増大して操舵フィーリングの低下を生じ易い装置において、上記トルクリップル分を大きく減衰させることができる。この結果、比較的大きいアシスト力で操舵補助を行う必要があるステアリング操作、例えば停止中の車両において、操向車輪のタイヤ角を変更する据え切り操作などのアシスト操作を安定した状態で行わせることができる。

[0050] 尚、上記の説明では、操舵軸2に電動モータ5が減速機構4を介して連結されるコラムアシスト式の電動パワーステアリング装置に適用した場合を示したが、本発明は所定の電流高次成分に起因するトルクリップルを打ち消すための電流高次成分用の補償値を決定するトルクリップル補償決定手段を設けたものであればよい。具体的には、例えば電動モータ5がラックピニオン式伝達機構6のラック軸に連結されて、このラック軸の移動をアシストするラックアシスト式等の他のアシスト形式の装置にも適用することができる。

また、上記の説明では、所定の電流高次成分として、第5、第7、第11、及び第13次成分に起因するトルクリップルを打ち消すための補償値を決定する構成について説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、基本波(1次成分)に対し重畳され易い高調波電流成分、例えば図10に示したように第5次及び第7次電流成分を

補償(相殺)するための補償値を決定する構成でもよい。

[0051] また、上記の説明では、トルクリップル補償決定部101の磁界歪み補償部18及び電流高次歪み補償部19内に一部の機能ブロックを共用した上記ゲイン補償演算手段と位相補償演算手段とを設けた場合について説明したが、本発明はこれに限定されるものではない。例えば上記の演算手段をトルクリップル補償決定部101の各補償部18、19内に設けることなく、当該補償決定部101とフィードバック制御部200との間に配置し、各補償部18、19がロータ角度位置検出器35からの電気角 θ_{re} と、加算器22からのq軸基本電流指令値 i^*_q0 とを用いて磁界歪み用及び電流高次歪み用の補償値をそれぞれ決定し、これらの決定値を上記ゲイン補償演算手段が求めたゲイン補償値と位相補償演算手段が求めた位相補償値とで補正してフィードバック制御部200に指令値として入力させる構成でもよい。

[0052] また、上記の説明では、例えば電流高次歪み補償値決定部44内に電流高次歪み補償マップ44aを格納する構成について説明したが、上記(21)〜(30)式に示した数式をマイコン100内に記憶させ、同決定部44がこれらの数式を用いて演算することで補償値を決定する構成でもよい。

また、上記の説明では、電動モータ5に3相ブラシレスモータを使用した場合について説明したが、本発明の電動モータはこれに限定されるものではなく、3相以外の相数のブラシレスモータやブラシ付きの直流モータなどの他の形式のモータを使用した装置にも適用することができる。

請求の範囲

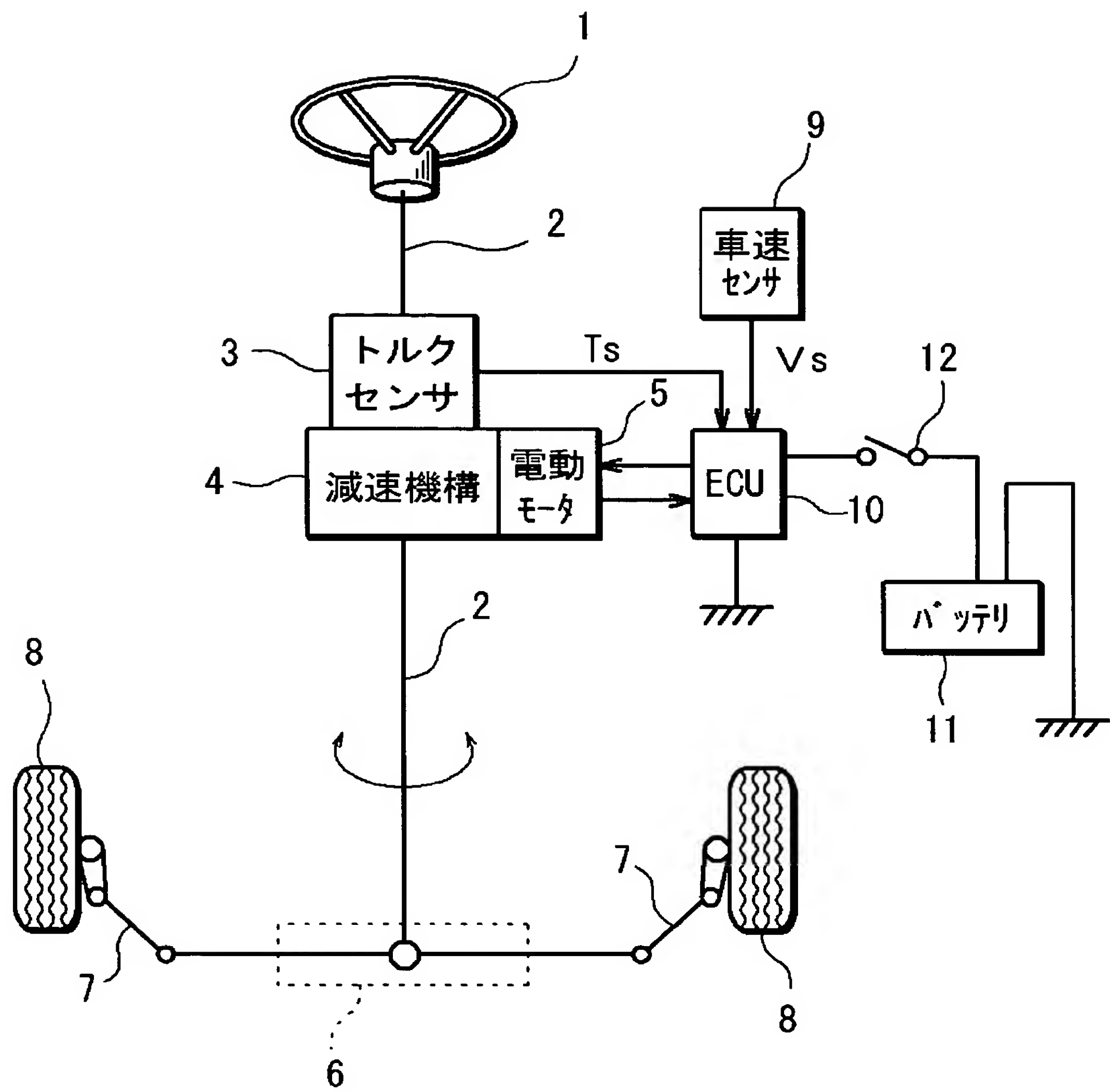
- [1] 操舵部材の操作に応じて電動モータの目標電流値を決定し、そのモータ動力を操舵機構に付与して操舵補助を行う電動パワーステアリング装置であって、
前記電動モータの回転位置情報と決定された前記目標電流値とを用いて、当該モータを流れる電流の所定の高次成分に起因するトルクリップルを打ち消すための電流高次成分用の補償値を決定するトルクリップル補償決定手段と、
前記トルクリップル補償決定手段からの補償値を用いて、前記決定された目標電流値を補正する補正手段と、
前記補正手段によって補正された後の目標電流値に基づき、前記電動モータをフィードバック制御するフィードバック制御手段と
を備えたことを特徴とする電動パワーステアリング装置。
- [2] 前記トルクリップル補償決定手段は、前記決定された目標電流値に応じて、前記電流高次成分用の補償値を変化させることを特徴とする請求項1に記載の電動パワーステアリング装置。
- [3] 前記トルクリップル補償決定手段には、
前記電流高次成分用の補償値を決定する電流高次歪み補償部に加えて、
前記電動モータの回転位置情報と決定された前記目標電流値とを用いて、当該モータ内に形成される磁界の歪みに起因するトルクリップルを抑制するための磁界歪み用の補償値を決定する磁界歪み補償部が設けられていることを特徴とする請求項1または2に記載の電動パワーステアリング装置。
- [4] 前記電動モータ及び前記フィードバック制御手段を含んだ電流制御系と、
前記回転位置情報を基に前記電動モータの回転速度を検出する回転速度検出手段と、
前記回転速度検出手段からの前記電動モータの回転速度に基づいて、前記電流制御系の周波数特性に依存するゲイン低下を補償するためのゲイン補償値を求めるゲイン補償演算手段とを備え、
前記補正手段は、前記トルクリップル補償決定手段からの補償値と、前記ゲイン補償演算手段からのゲイン補償値とを用いて、前記決定された目標電流値を補正する

ことを特徴とする請求項1〜3のいずれかに記載の電動パワーステアリング装置。

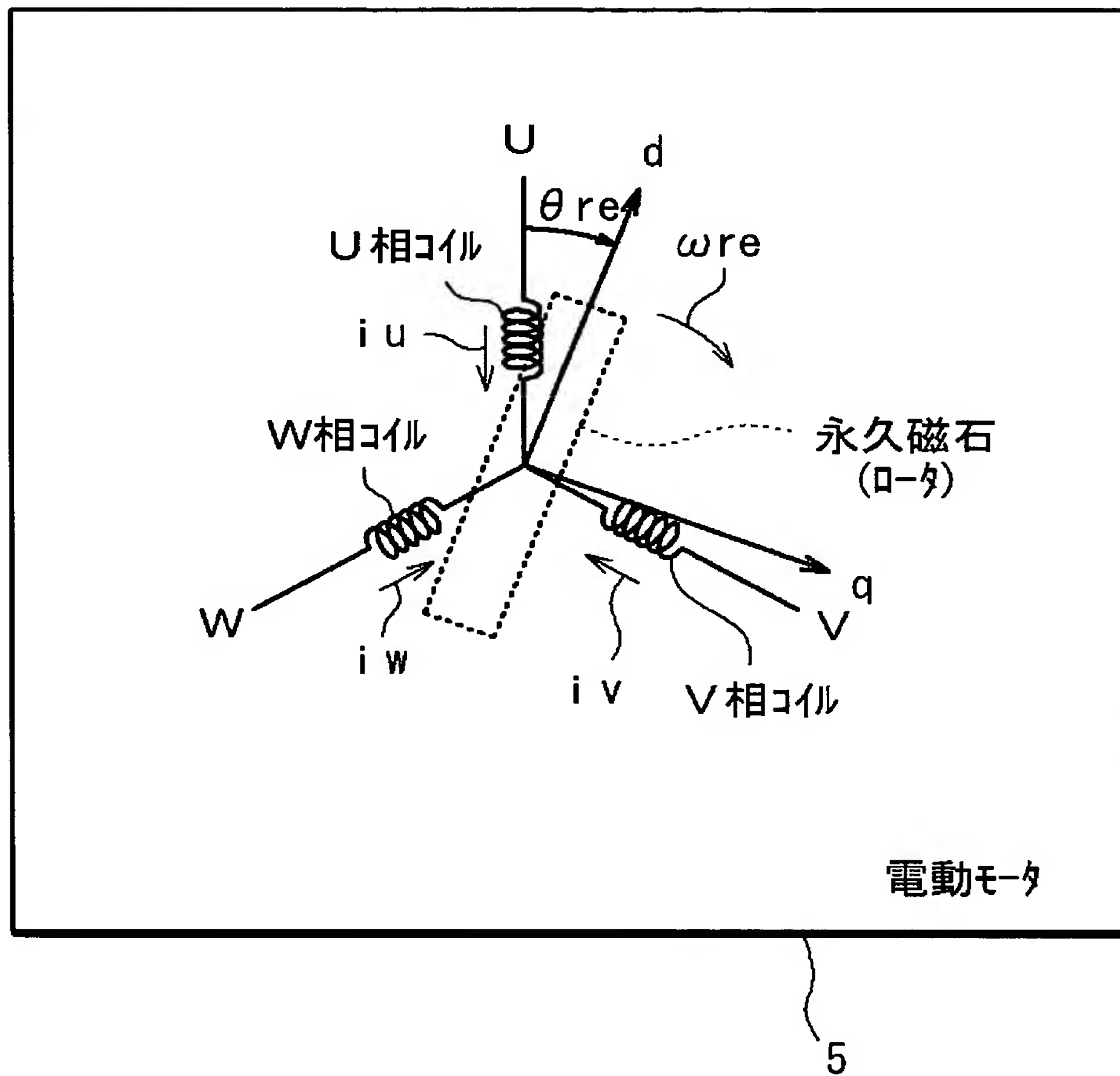
- [5] 前記回転速度検出手段からの前記電動モータの回転速度に基づいて、前記電流制御系の周波数特性に依存する位相遅れを補償するための位相補償値を求める位相補償演算手段を備え、

前記補正手段は、前記トルクリップル補償決定手段からの補償値と、前記ゲイン補償演算手段からのゲイン補償値と、前記位相補償演算手段からの位相補償値とを用いて、前記決定された目標電流値を補正することを特徴とする請求項4に記載の電動パワーステアリング装置。

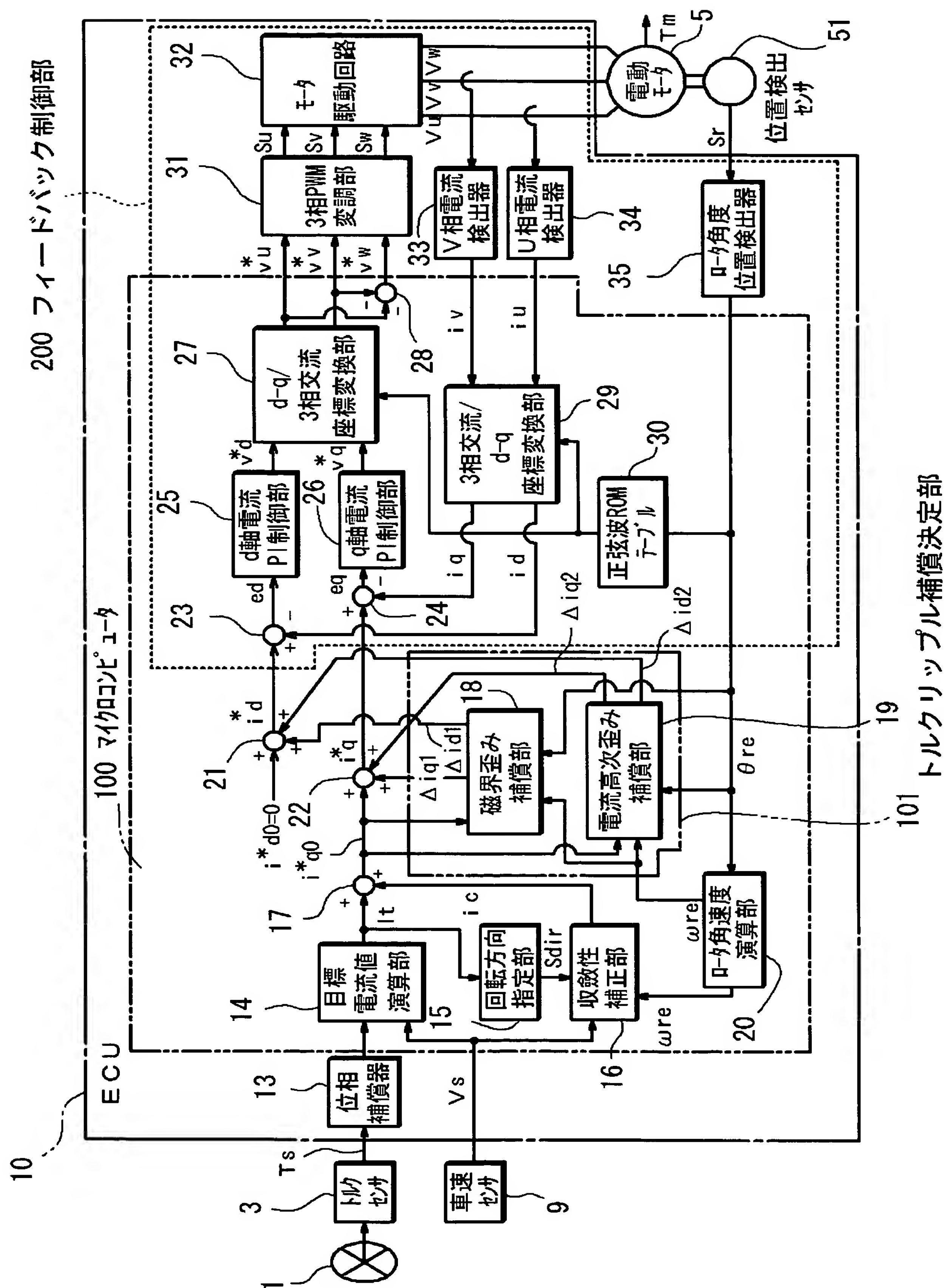
[図1]



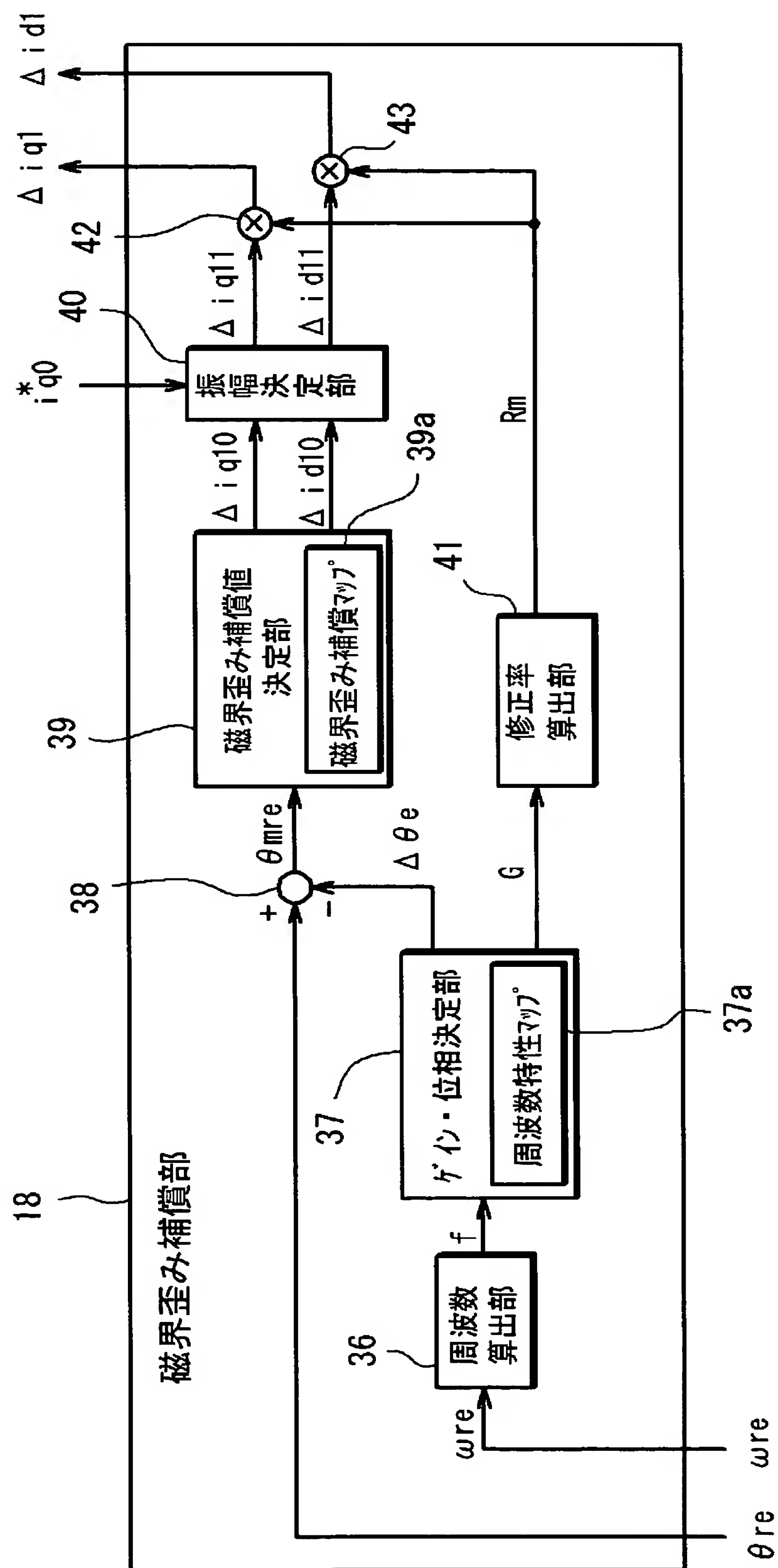
[図2]



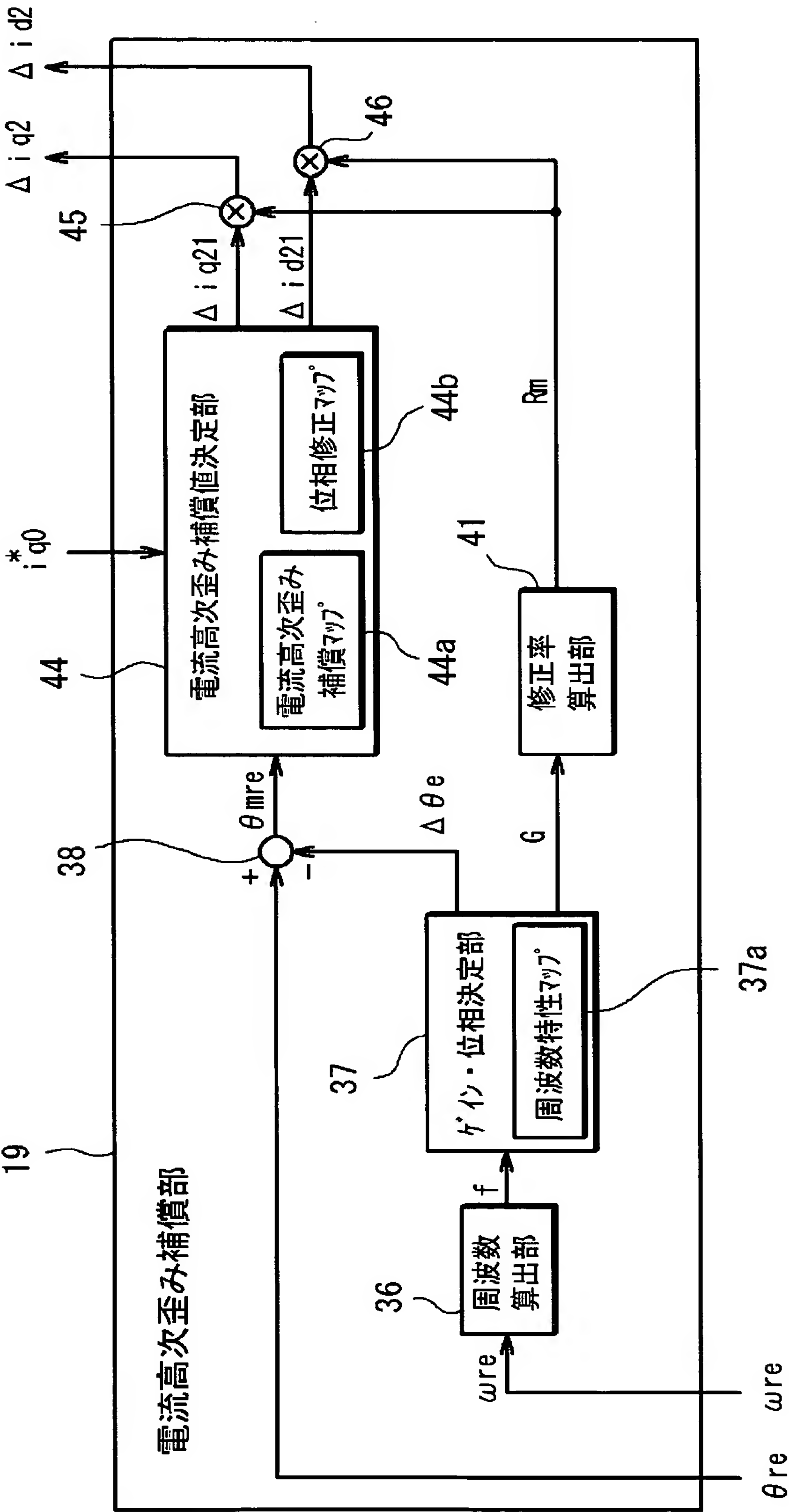
[図3]



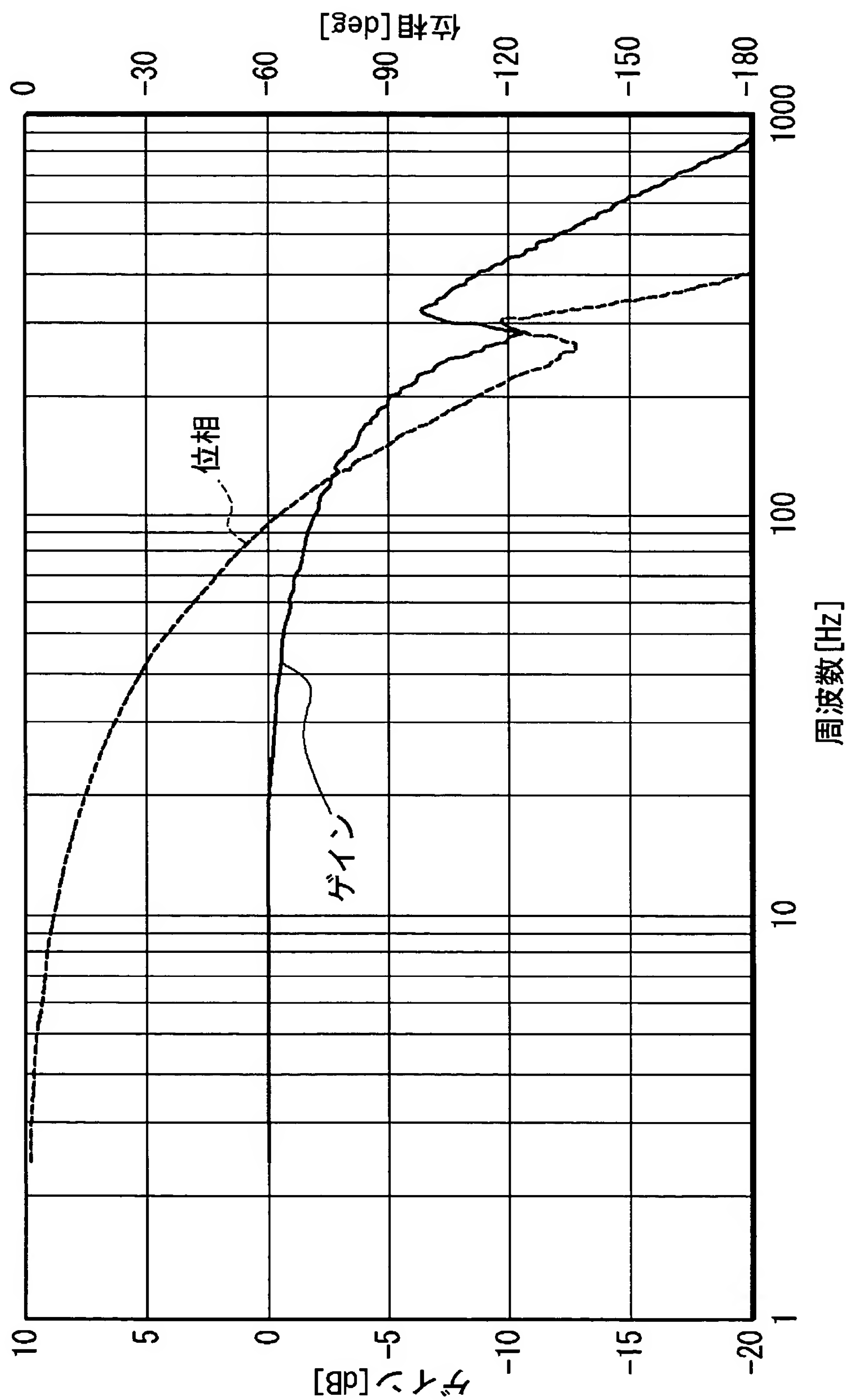
[図4]



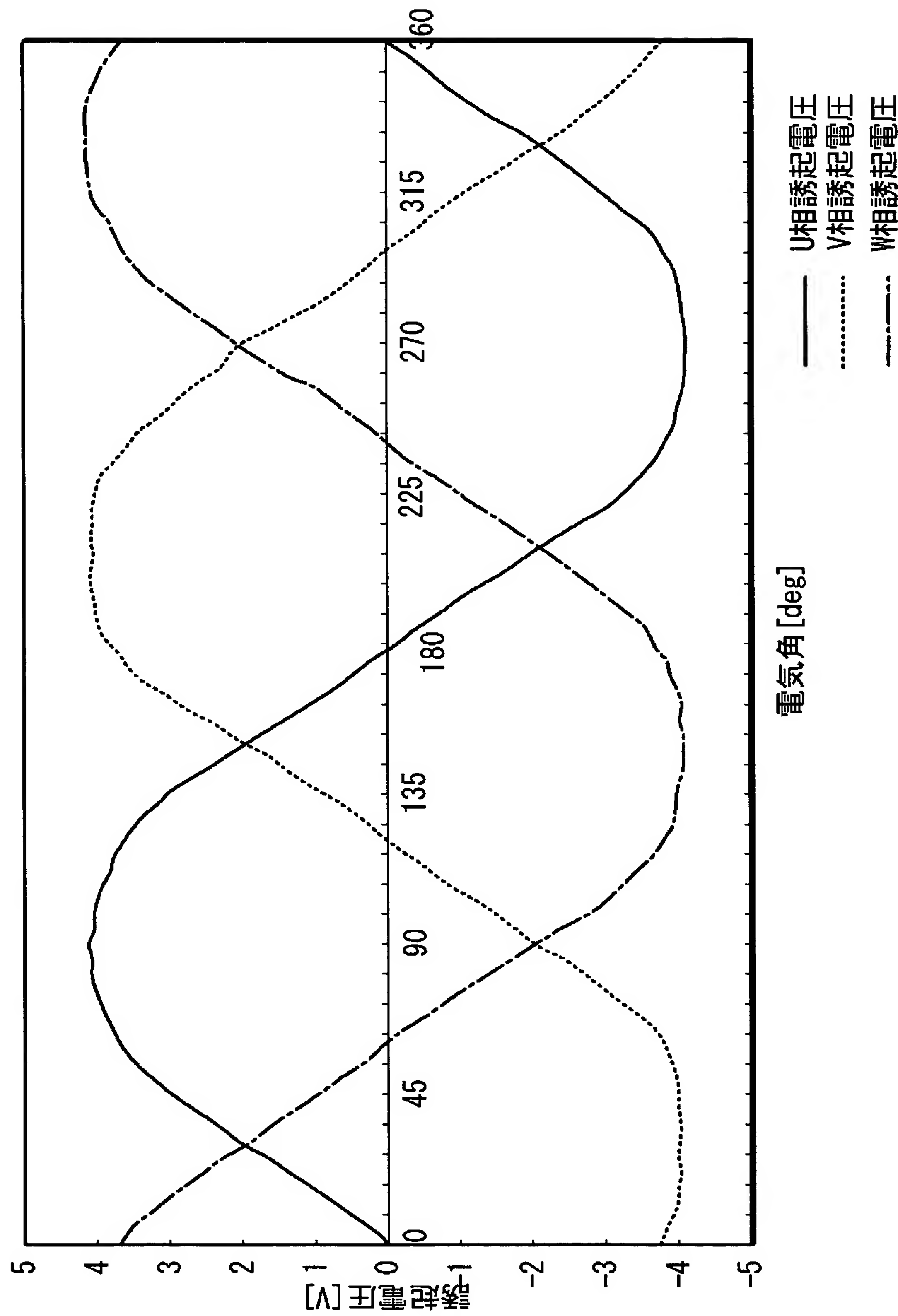
[図5]



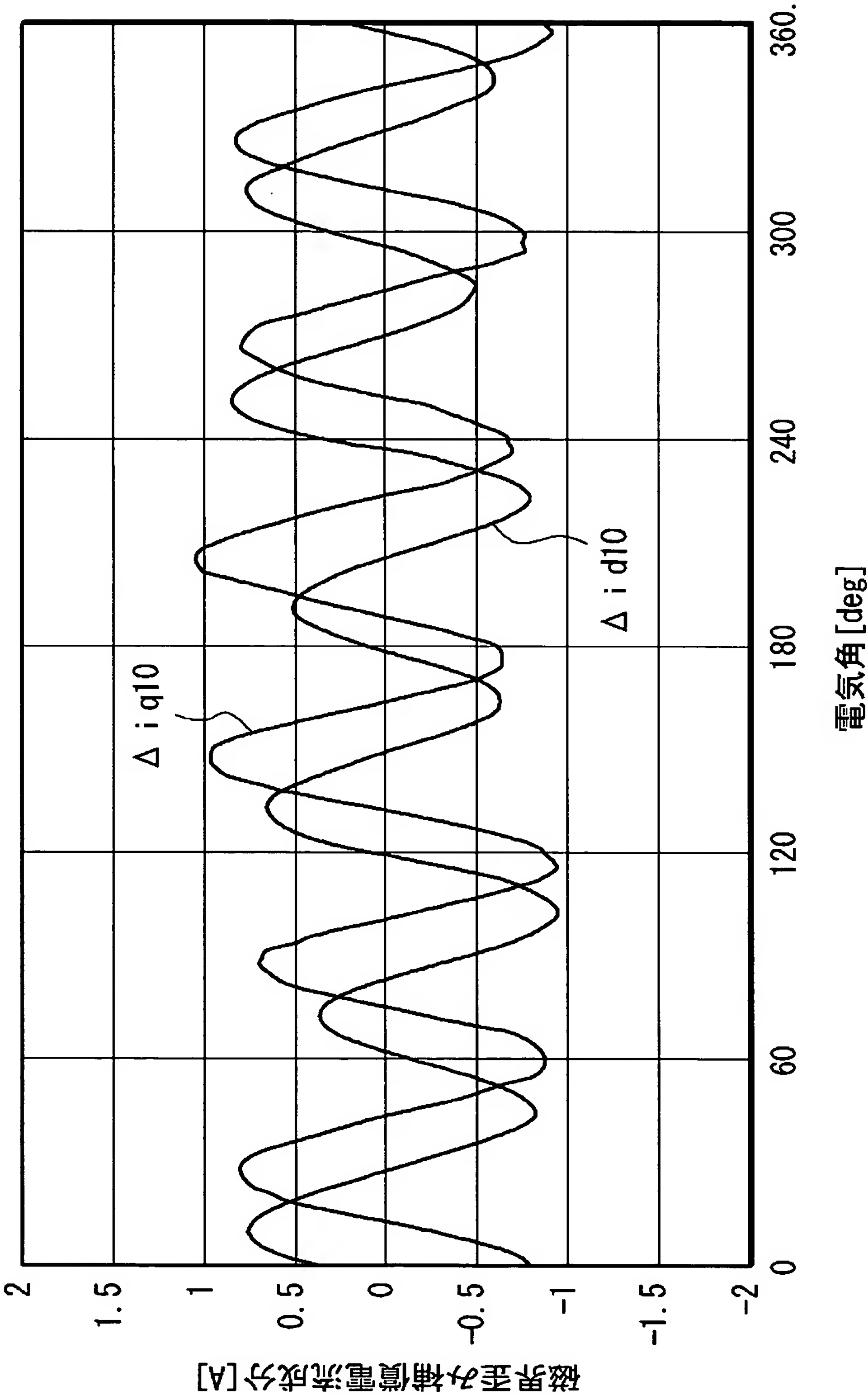
[図6]



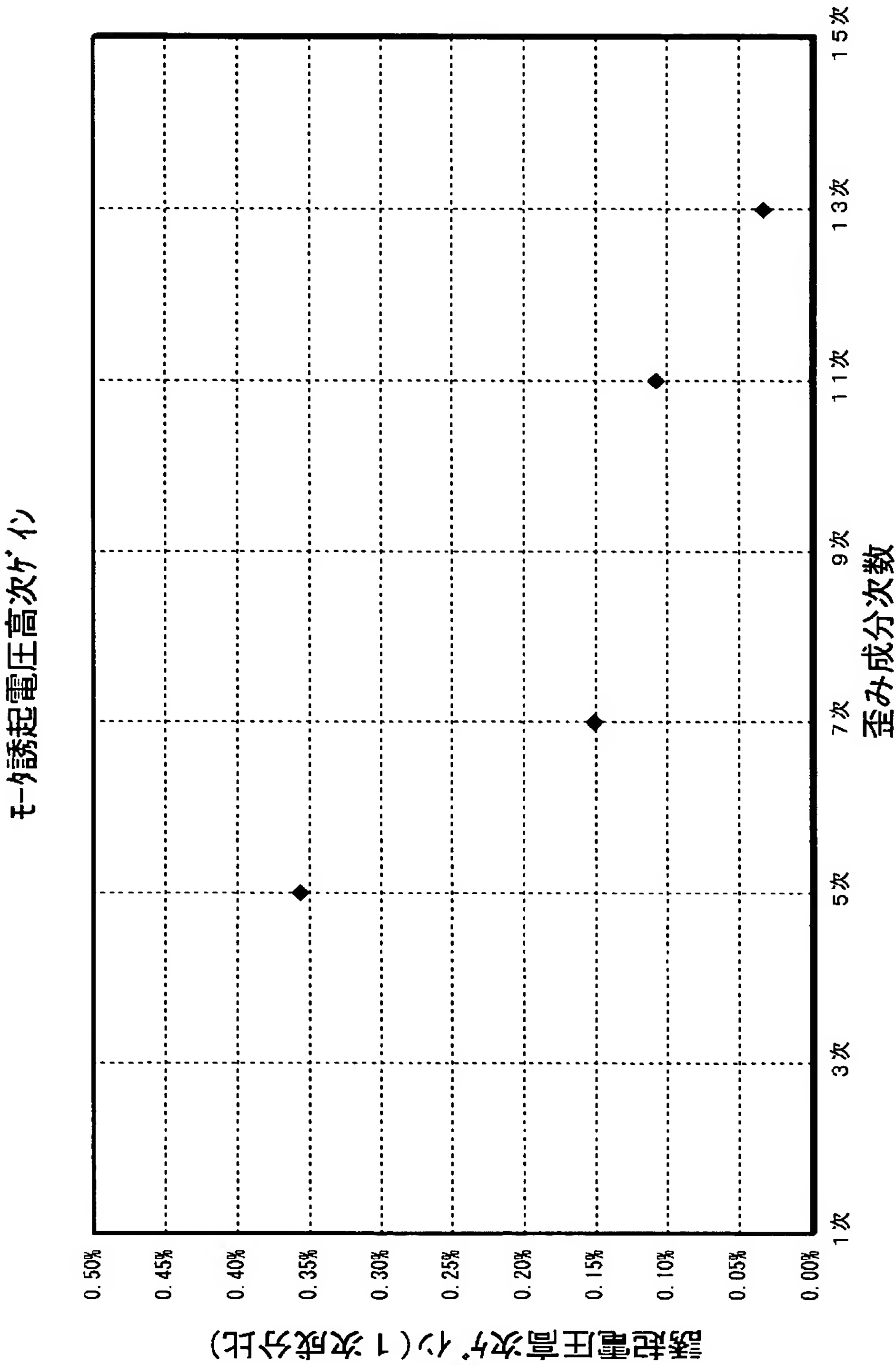
[図7]



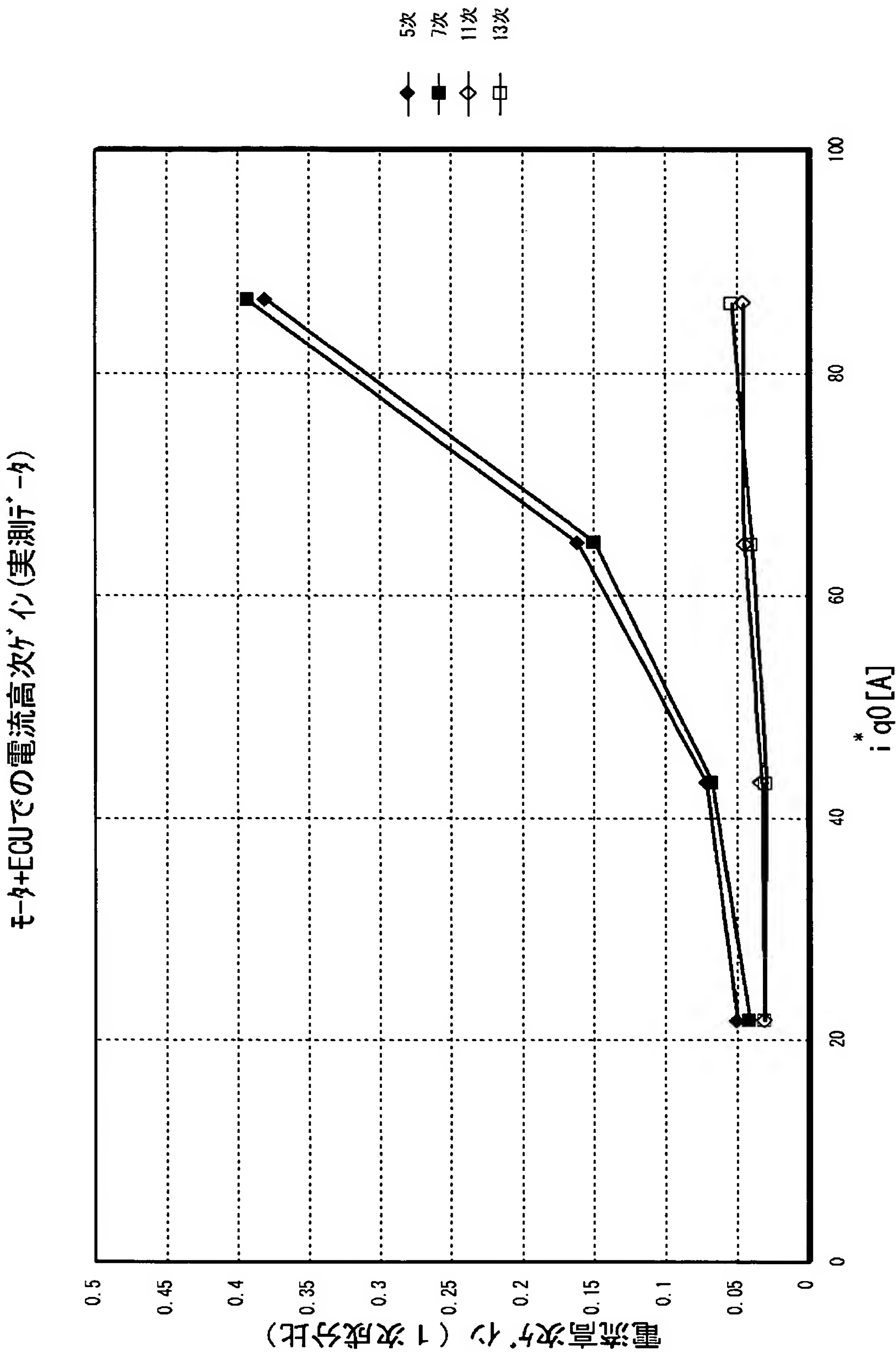
[図8]



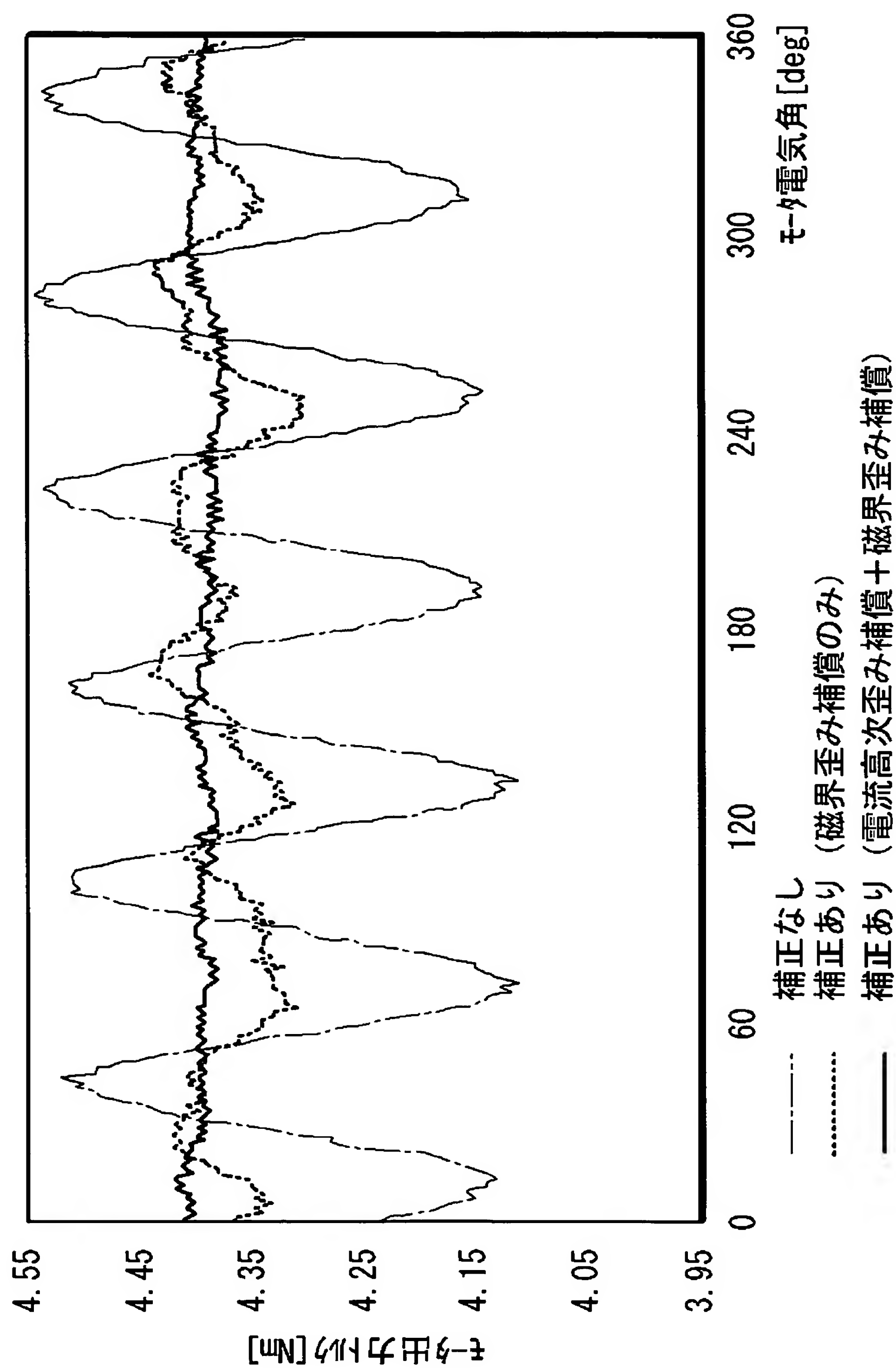
[図9]



[図10]



[図11]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014644

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl⁷ B62D6/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁷ B62D6/00-6/06, B62D5/04, H02P6/00-6/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1926-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2001-186790 A (Mitsubishi Electric Corp.), 06 July, 2001 (06.07.01), Par. Nos. [0024] to [0028]; Fig. 8 (Family: none)	1-3 4, 5
Y A	JP 2003-137110 A (Koyo Seiko Co., Ltd.), 14 May, 2003 (14.05.03), Full text; Figs. 1 to 3 & EP 1308368 A2 & US 2003/0109974 A1	1-3 4, 5
A	JP 2001-18822 A (Toyota Motor Corp.), 23 January, 2001 (23.01.01), Full text; Figs. 1 to 4 (Family: none)	1-5

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
07 January, 2005 (07.01.05)

Date of mailing of the international search report
25 January, 2005 (25.01.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014644

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2002-525021 A (Kone Corp.), 06 August, 2002 (06.08.02), Full text; Figs. 1 to 3 & WO 00/14864	1, 2
Y	JP 4-79788 A (Hitachi, Ltd.), 13 March, 1992 (13.03.92), Full text; Figs. 1 to 9 (Family: none)	1, 2
Y	JP 4-54872 A (Hitachi, Ltd.), 21 February, 1992 (21.02.92), Full text; Figs. 1 to 14 (Family: none)	1, 2
Y	JP 2002-247899 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 30 August, 2002 (30.08.02), Full text; Figs. 1 to 14 & EP 1211798 A2 & US 2002/97015 A1	1-3
Y	JP 2002-223600 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 09 August, 2002 (09.08.02), Full text; Figs. 1 to 25 & EP 1211798 A2 & US 2002/97015 A1	1-3
A	JP 62-64293 A (Yokogawa Electric Corp.), 23 March, 1987 (23.03.87), Full text; Fig. 1 (Family: none)	1-5
A	JP 64-60264 A (Hitachi, Ltd.), 07 March, 1989 (07.03.89), Full text; Figs. 1 to 8 (Family: none)	1-5
A	JP 2003-199390 A (Toshiba Corp.), 11 July, 2003 (11.07.03), Full text; Figs. 1 to 9 (Family: none)	1-5
P, Y	JP 2004-215399 A (Yaskawa Electric Corp.), 29 July, 2004 (29.07.04), Full text; Figs. 1 to 5 (Family: none)	1, 2
P, A	JP 2004-64909 A (Nissan Motor Co., Ltd.), 26 February, 2004 (26.02.04), Full text; Figs. 1 to 7 (Family: none)	1-5
E, A	JP 2004-328814 A (Koyo Seiko Co., Ltd.), 18 November, 2004 (18.11.04), Full text; Figs. 1 to 9 (Family: none)	1-5

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ B62D6/00		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ B62D6/00-6/06, B62D5/04, H02P6/00-6/02		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1926-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2005年 日本国登録実用新案公報 1994-2005年 日本国実用新案登録公報 1996-2005年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y A	JP 2001-186790 A (三菱電機株式会社) 200 1. 07. 06, 段落番号【0024】-【0028】, 第8図 (ファミリーなし)	1-3 4, 5
Y A	JP 2003-137110 A (光洋精工株式会社) 200 3. 05. 14, 全文, 第1-3図 & EP 1308368 A2 & US 2003/0109974 A1	1-3 4, 5
A	JP 2001-18822 A (トヨタ自動車株式会社) 200 1. 01. 23, 全文, 第1-4図 (ファミリーなし)	1-5
Y	JP 2002-525021 A (コネ コーポレーション) 2 002. 08. 06, 全文, 第1-3図 & WO 00/148	1, 2
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 07. 01. 2005	国際調査報告の発送日 25. 1. 2005	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 森林 宏和 電話番号 03-3581-1101 内線 6746	3Q 3025

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
	64	
Y	JP 4-79788 A (株式会社日立製作所) 1992. 03. 13, 全文, 第1-9図 (ファミリーなし)	1, 2
Y	JP 4-54872 A (株式会社日立製作所) 1992. 02. 21, 全文, 第1-14図 (ファミリーなし)	1, 2
Y	JP 2002-247899 A (日産自動車株式会社) 2002. 08. 30, 全文, 第1-14図 & EP 1211798 A2 & US 2002/97015 A1	1-3
Y	JP 2002-223600 A (日産自動車株式会社) 2002. 08. 09, 全文, 第1-25図 & EP 1211798 A2 & US 2002/97015 A1	1-3
A	JP 62-64293 A (横河電気株式会社) 1987. 03. 23, 全文, 第1図 (ファミリーなし)	1-5
A	JP 64-60264 A (株式会社日立製作所) 1989. 03. 07, 全文, 第1-8図 (ファミリーなし)	1-5
A	JP 2003-199390 A (株式会社東芝) 2003. 07. 11, 全文, 第1-9図 (ファミリーなし)	1-5
PY	JP 2004-215399 A (株式会社安川電機) 2004. 07. 29, 全文, 第1-5図 (ファミリーなし)	1, 2
PA	JP 2004-64909 A (日産自動車株式会社) 2004. 02. 26, 全文, 第1-7図 (ファミリーなし)	1-5
EA	JP 2004-328814 A (光洋精工株式会社) 2004. 11. 18, 全文, 第1-9図 (ファミリーなし)	1-5

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.